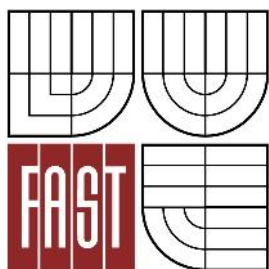




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ KRAJINY

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF LANDSCAPE WATER MANAGEMENT

NÁVRH PARAMETRŮ MALÉ VODNÍ NÁDRŽE V PROSTŘEDÍ GIS

THE PROPOSAL PARAMETERS OF THE SMALL WATER RESERVOIR IN GIS ENVIRONMENT.

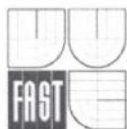
DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JAKUB FELTL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Dr. Ing. PETR DOLEŽAL



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor 3607T027 Vodní hospodářství a vodní stavby
Pracoviště Ústav vodního hospodářství krajiny

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant Feltl Jakub, Bc.

Název Návrh parametrů malé vodní nádrže v prostředí GIS

Vedoucí diplomové práce doc. Dr. Ing. Petr Doležal

Datum zadání diplomové práce 31. 3. 2011

Datum odevzdání diplomové práce 13.1.2012

V Brně dne 31. 3. 2011

.....
prof. Ing. Miloš Starý, CSc.
Vedoucí ústavu



.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, pouze s odbornou pomocí doc. Dr. Ing. Petra Doležala. Dále prohlašuji, že veškeré podklady, ze kterých jsem čerpal jsou uvedeny v seznamu literatury

V Brně dne 13. ledna 2012

.....

Jakub Feltl

Bibliografická citace VŠKP

FELTL, Jakub. Návrh parametrů malé vodní nádrže v prostředí GIS. Diplomová práce. Brno, 2012. 70 s., 3 s. příl. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav vodního hospodářství krajiny. Vedoucí diplomové práce doc. Dr. Ing. Petr Doležal.

Abstrakt

Tato práce je zaměřena na navrhování parametrů retenčních nádrží na malých povodích pomocí srážko-odtokového modelování. K tomuto účelu byly použity moderní výpočetní programy, zabývající se právě tímto tématem (GIS, HEC-HMS). K vytvoření srážko-odtokového modelu bylo využito všech dostupných podkladů (BPEJ, LPIS, N-leté srážkové úhrny, 3D vrstevnice ...), aby byl model co nejspolehlivější. Výhodou této metody je, na rozdíl od jiných dosud využívaných metod to, že umožňuje do určité míry odhadnout tvar hydrogramu a tudíž i objem povodňové vlny. Hlavně objem odtoku, který je nejdůležitější z hlediska bezpečnosti návrhu retenčních nádrží, je v dnešní inženýrské praxi, nesprávným vyhodnocením výsledků, často poddimenzován. Další výhodou této metody je množství variabilních situací, na které může být daná nádrž navržena a posléze testována. Scénáře jsou závislé na vlhkostních podmínkách, půdním pokryvu, hydraulických, hydrologických transformacích a dalších.

Klíčová slova

Efektivní déšť, přímý odtok, přívalové srážky, malé povodí, kulminační průtok, hydrogram, hyetogram

Abstract

This report deals with rainfall-runoff modeling and small water reservoir projection with usage of modern software equipments (GIS, HEC-HMS), using maximum number of available data sources (BPEJ, LPIS, N-year rainfall gages, 3D contours ...). The advantage of this method is that it is possible to predict the shape of hydrograph and flood wave volume as well. Other methods cannot offer judgment of flood wave volume and hydrograph shape as this method does. The most important thing in small water reservoir projection is the flood wave volume value, which is undervalued nowadays using wrong evaluation. This method's advantage is variability of scenarios depending on soil surface, used agricultures, hydraulic and hydrologic parameters etc.

Keyword

Effective precipitation, direct runoff, torrential rain, small basin, peak flow, hydrograph, hyetograph

Poděkování:

Na tomto místě bych rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce doc. Dr. Ing. PETRU DOLEŽALOVÍ za cenné rady, pomoc při zpracování a čas, který mi věnoval.

OBSAH

ÚVOD	11
CÍL	12
INFORMACE O EXPERIMENTÁLNÍM POVODÍ.....	13
POPIS ŘEŠENÍ	14
POUŽITÉ VÝPOČETNÍ METODY	15
TRANSFORMAČNÍ FUNKCE POVODÍ	15
<i>Jednotkový hydrogram</i>	<i>15</i>
<i>Clarkův jednotkový hydrogram</i>	<i>17</i>
HYDROLOGICKÁ TRANSFORMACE.....	19
<i>Metoda CN křivek.....</i>	<i>19</i>
HYDRAULICKÁ TRANSFORMACE	21
<i>Metoda Muskingum</i>	<i>21</i>
<i>Metoda Muskingum-Cunge</i>	<i>22</i>
TRANSFORMACE POVODŇOVÉ VLNY POMOCÍ NÁDRŽE	23
<i>Metoda výtokové funkce</i>	<i>23</i>
VSTUPNÍ DATA	25
VLASTNOSTI PŮDNÍHO PROFILU	25
VYUŽITÍ PARCEL LPIS	26
TOPOLOGIE ÚZEMÍ	29
SRÁŽKY	30
VLHKOSTNÍ PODMÍNKY	31
SESTAVENÍ SRÁŽKO-ODTOKOVÉHO MODELU	32
KALIBRACE MODELU	34
POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ SRÁŽKO-ODTOKOVÉHO MODELU	39
UMÍSTĚNÍ NÁDRŽE V POZOROVANÉM POVODÍ.....	50
NÁVRH PARAMETRŮ RETENČNÍ NÁDRŽE	53
POROVNÁNÍ TRANSFORMAČNÍ SCHOPNOSTI	58
ZATÍŽENÍ EXTRÉMNÍ SRÁŽKO-ODTOKOVOU SITUACÍ.....	58

NÁVRH NÁDRŽE NA EXTREMNÍ POVODŇOVOU SITUACI.....	60
VÝPOČET BILANCE VODY V NÁDRŽI.....	60
ZÁVĚR	65
LITERATURA	67
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	68
SEZNAM TABULEK	70
SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFICKÝCH PŘÍLOH	71

ÚVOD

S rozvojem pozemkových úprav a v návaznosti na přidělování dotací začíná být věnována větší pozornost ochraně malých povodí (povodí drobných vodních toků). Jde zejména o snahu eliminovat nepříznivé důsledky vodní eroze a povodní z přívalových srážek.

Nejen devastace přírodních podmínek, ale i zastavěného území představuje hrozbu, která se promítá i do dalších sfér, jako je útlum zemědělské činnosti, snížení možnosti zaměstnanosti apod. Tomu je třeba čelit vhodným návrhem ochranných opatření.

Analýzou výsledků návrhů těchto opatření, realizovaných v rámci procesu pozemkových úprav, se ukazuje nutnost definování určitých pravidel, která podpoří efektivnost a účinnost těchto opatření. Velkým problémem je zejména dimenzování opatření.

Malá povodí, kde jsou tato opatření navrhována, jsou velmi specifická. Hlavním problémem malých povodí je ve většině případů absence podrobného měření a následného vyhodnocování zejména hydrologických údajů a důsledků působení eroze na zemědělské půdy. To velmi omezuje možnost kalibrace a využívání některých simulačních modelů, zejména pro řešení povrchového odtoku. Příčinou extrémních odtokových situací, které způsobují povodně a výrazně devastují půdu a zástavbu jsou přívalové srážky. Jejich předpovídání je velmi problematické a odezva povodí na tyto srážky je příliš rychlá.

V dnešní době stále více se rozšiřující implementace programu GIS při analýze protierozních opatření v důsledku řešení komplexních pozemkových úprav se nabízí otázka proč toto prostředí nevyužít i při prvotním řešení a návrhu retenčních nádrží na malých a velmi malých povodích. Právě touto otázkou se zabývala tato diplomová práce. Výzkum probíhal na experimentálním povodí Němčického potoka, v okrese Blansko, o rozloze cca 4 km². Při řešení tohoto problému nebyl použit pouze software GIS, ale byly implementovány také dva další programy využívající deterministických srážko-odtokových modelů, a to HEC-HMS a HEC-GeoHMS. Obrovskou výhodou těchto dvou programů není pouze velká variabilita při volbě vstupních komponent a parametrů, ale i to, že jsou zdarma ke stažení na stránkách US Army Corps of Engineers.[1]

CÍL

Cílem této diplomové práce je navržení určitého postupu při navrhování retenčních nádrží s transformačními vlastnostmi na malých a velmi malých povodích, kde je absolutní nedostatek hydrologických měření.

Tento postup je založen na využití moderních výpočetních programů, jako je GIS, v dnešní praxi hojně využívaný program při řešení komplexních pozemkových úprav a počítání erozního smyvu. Dalším výpočetním aparátem je program HEC-HMS používaný v mnoha zemích světa při srážko-odtokovém modelování.

Zvolením právě tohoto postupu je možné v maximální míře využít všech dostupných podkladů. Ať už to jsou data popisující půdní vlastnosti (BPEJ), chování povodí v závislosti na půdním pokryvu (LPIS), úhrn srážek s odpovídající dobou opakování a v neposlední řadě také data popisující topologii daného území (3D vrstevnice) a mnoho dalších. Tato data jsou velmi důležitá při popisu vlastností daného povodí, jelikož i území se stejnou plochou povodí mohou mít naprosto rozdílné transformační schopnosti v závislosti na již zmíněných pedologických, hydrologických, topologických a jiných vlastnostech.

Díky možnosti měnit transformační vlastnosti povodí v závislosti na předchozím nasycení půdního profilu, změnou půdního pokryvu a dalších je možné navrhnout parametry nádrže (poloha hrany bezpečnostního přelivu, poloha koruny hráze) a poté navrženou nádrž testovat na extrémní povodňové situace.

INFORMACE O EXPERIMENTÁLNÍM POVODÍ

Zájmová oblast experimentálního povodí částečně prochází obcí Němčice v okrese Blansko a dále se rozprostírá jihozápadním směrem od této obce. Celková plocha povodí je 3,694 km². Němčický potok se vlévá do říčky Luhy, která v Moravském krasu pokračuje jako Punkva a v Blansku vtéká do Svitavy. Reliéf experimentálního povodí tvoří mírně členité, dlouhé pozvolné svahy Dražanské vrchoviny. Rozvodnice v nejvyšším bodě prochází nadmořskou výškou 653,98 m, závěrný profil je ve výšce 545,85 m.n.m, průměrná nadmořská výška zájmového povodí je 599,92 m.n.m.



Obr. 1 Rozvodnice povodí Némčického potoka

Klimaticky patří zájmové území do oblasti mírně teplé, okrsku mírně vlhkého. Průměrná roční teplota se pohybuje kolem 6°C, průměrný roční úhrn srážek dosahuje 652 mm.

Územní celek leží v oblasti starých zvrásněných sedimentů. Východní část území je součástí kulmu. V západní polovině tvoří podloží horniny krystalinika. V jihozápadní části katastru Němčice se nacházejí čtvrtohorní pleistocénní sedimenty. Půdní pokryv tvoří převážně kambizemě modální eubazické až mezobazické na horninách kulmu, místy slabě oglejené, převážně středně těžké a středně skeletovité. V horních partiích svahů jsou půdní horizonty oderodované. Nachází se zde mělké kambizemě litické, středně těžké nebo lehčí. V západní části povodí se vytvořily hnědozemě luvické oglejené na svahových hlínách, středně těžké, ve spodině těžší. Údolí potoka vyplňují gleje modální na svahovinách, středně těžké až těžké. Na svazích na méně propustných svahovinách se vyvinuly pseudogleje modální středně těžké, ve spodině těžší.

Půdy v zájmovém povodí jsou negativně ovlivněny plošnou vodní erozí. Intenzivně se zemědělsky hospodaří na velkých honech rozkládajících se na dlouhých svazích se sklonem 3 až 4°. V důsledku dlouhodobého odnosu svrchních vrstev půdy kambizemě modální v zájmovém území degradovaly na kambizemě litické s hloubkou do 30 cm, lokálně jen 18 cm hluboké.[2]

POPIS ŘEŠENÍ

V této práci bylo pro řešení srážko-odtokového modelování v oblasti Němčického potoka použito v dnešní době dvou nejpoužívanějších programů z této oblasti a to GIS a HEC-HMS.

První jmenovaný od společnosti ESRI dokáže pracovat jak s rastrovými tak vektorovými daty. Má široké uplatnění v hydrologické praxi převážně slouží k analýzám povodí a vytváření dat o jeho reprezentativních vlastnostech jako je například digitální model terénu nebo prostorové rozložení vlastností půd. V neposlední řadě je také využíván při vytváření map rizika v rámci protipovodňové ochrany a mnoha dalších odvětvích.

Srážkoodtokový software HEC-HMS byl zpracován v US Army Corps of Engineers. Software a je podrobně popsán v US Army Corps of Engineers [3]. Jeho velkou výhodou je, že je zdarma ke stažení na webových stránkách US Army Corps of Engineers a navíc

disponuje příjemným uživatelským prostředím, se kterým se každý uživatel rychle sžije a poté už je zadávání vstupních veličin a řešení srážko-odtokových situací velmi snadné a rychlé. Umožňuje stanovit jak velikost přímého a základního odtoku, tak řešení transformační odezvy povodí na průběh příčinných srážek. Je tak vhodný pro určení charakteristik povodně, ale i pro simulaci odtoku. Všechny vstupní veličiny je možno zadávat velkou řadou různých způsobů. Vstupní srážka, ať už návrhová nebo příčinná, je zadávána ve formě (návrhového nebo příčinného) hyetogramu. V programu lze volit délku časového kroku, což je výhodou, jelikož u každé srážkoměrná stanice se tento interval liší. Tento program je přizpůsoben i dnešní technické době, kdy se velké množství měření srážek provádí metodou radarového snímání, pro tento případ je zde možnost vkládat srážkové úhrny formou rastrových dat. Tento způsob by mohl být využíván v případech operativního řízení či předpovědi průtoků, kde by vstupní údaje tvořily rastrová data z předpovědních modelů např. ALADIN.

Po zadání příčinných srážek je třeba, aby došlo k transformaci na přímý odtok. To je zajištěno množstvím transformačních funkcí povodí, zde je nejrozšířenější Clarkův jednotkový hydrogram (Clark Unit Hydrograph). Tento program dále nabízí transformaci pomocí kinematické vlny (Kinematic Wave), SCS jednotkového hydrogramu (SCS Unit Hydrograph) a mnoha dalších. Pro určení hydrologických ztrát je opět na výběr z velké škály metod, v našem případě byla zvolena SCS Curve Number založená na metodě CN čísel. Jedná se o metodu v dnešní době velice rozšířenou a hojně používanou. Mezi další využívané metody patří Green and Ampt vycházející z hydraulické vodivosti, rychlosti poklesu infiltrace a z procentuálního zastoupení nepropustného povrchu. Z hydraulické transformace se nabízí použití metod Muskingum-Cunge a Muskingum. První jmenovaný se používá v případech, kdy je známa geometrie koryta, u druhého probíhá transformace na základě doby koncentrace.

POUŽITÉ VÝPOČETNÍ METODY

Transformační funkce povodí

Jednotkový hydrogram

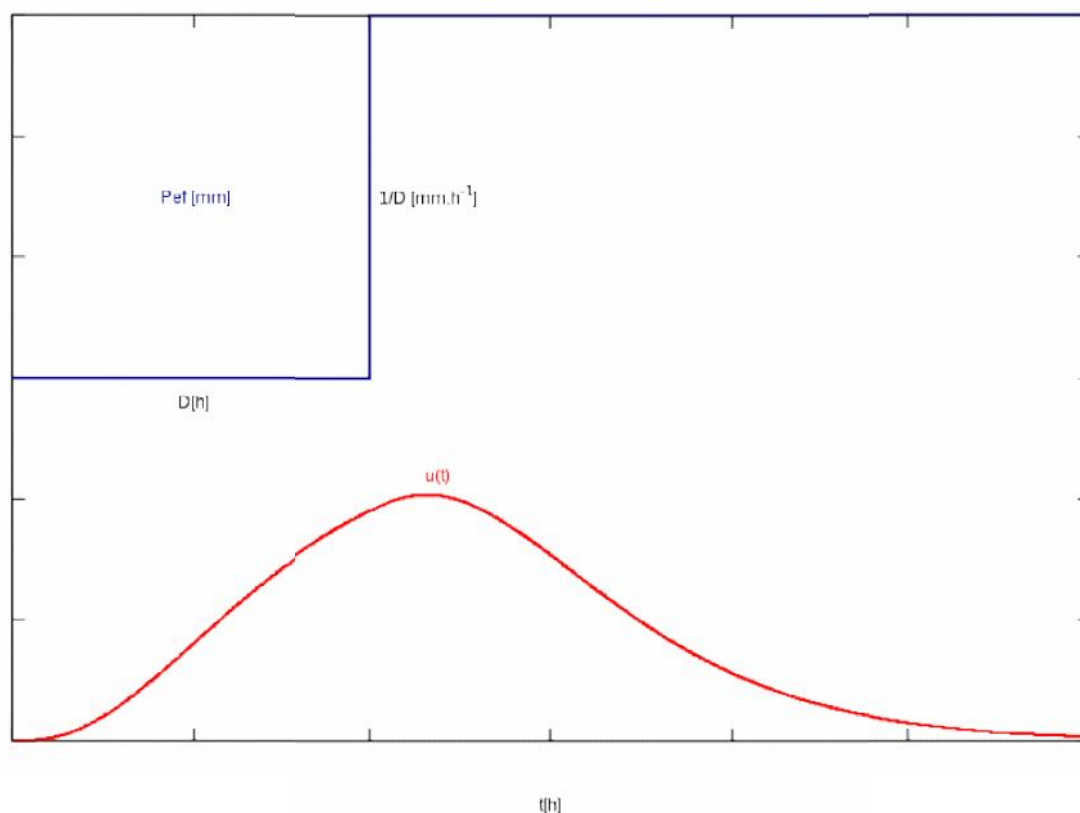
Jednotkový hydrogram je hypotetická odezva povodí na jednotkový efektivní déšť, vždy stejná pro déšť dané doby trvání. Využívá se v hydrologických modelech, umožňujících určit hodnoty odtoku na základě znalosti výšky srážky na povodí. Původní koncept

jednotkového hydrogramu navrhl Leroy Sherman v roce 1932, od té doby je teorie jednotkového hydrogramu dále rozvíjena a aplikována v mnoha variantách.

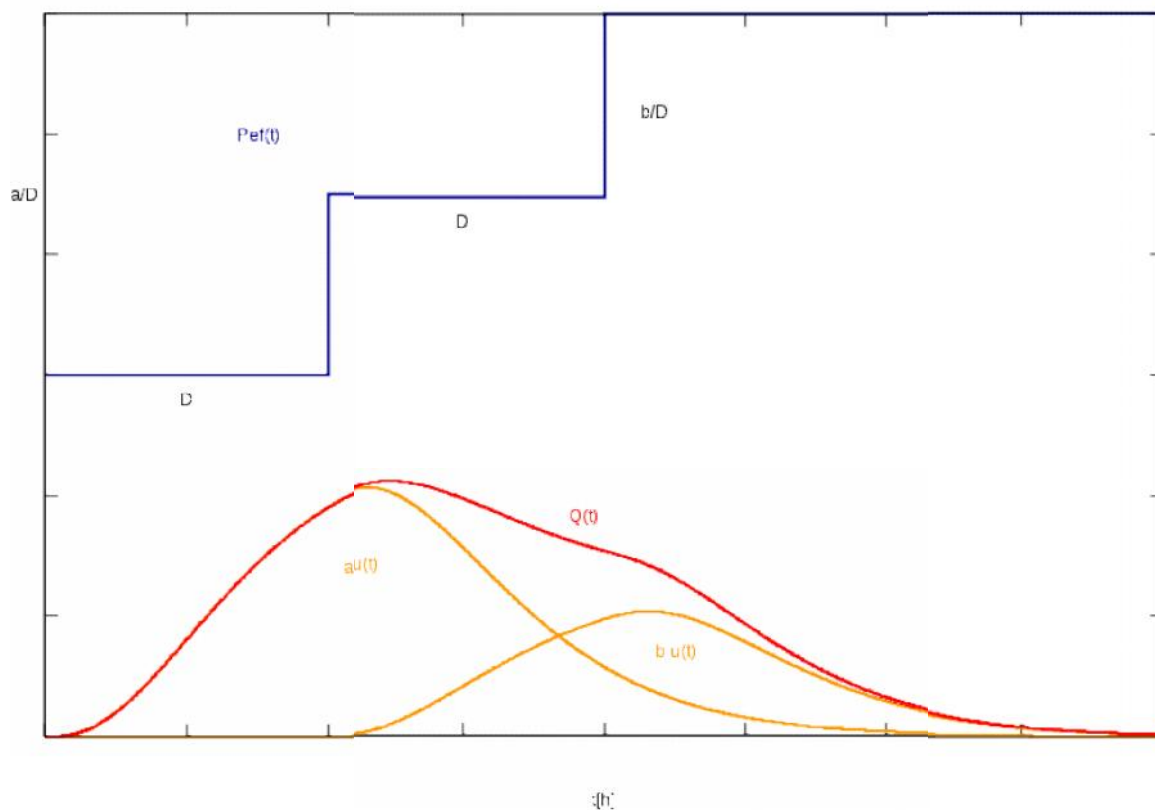
Povodí je jako celek považováno za systém, ve kterém se srážkový vstup (efektivní dešť) transformuje na výstup v podobě přímého odtoku. Transformační funkcí je jednotkový hydrogram (anglicky *unit hydrograph*, zkratka UH), který se definuje jako hydrogram přímého odtoku vyvolaný efektivním deštěm o jednotkovém objemu, o stálé intenzitě a rovnoměrně rozloženém na povodí, za předpokladu platnosti principu superpozice a principu časové invariance.

Podle **principu superpozice** závisí velikost výstupu lineárně na velikosti vstupu, časové rozložení výstupu není velikostí vstupu ovlivněno. Výsledný výstup je roven součtu výstupů vyvolaných jednotlivými vstupy.

Princip **časové invariance** zaručuje, že se vstupy lišící se vzájemně pouze časem svého počátku transformují do výstupů, které se od sebe liší také pouze časem svého počátku. Čas počátku vstupu nemá vliv na velikost ani časové rozložení výstupu.[4]



Obr. 2 Příklad jednotkového hydrogramu pro dešť doby trvání D [4]



Obr. 3 Skládání jednotkového hydrogramu s využitím principu superpozice a časové invariance [4]

Clarkův jednotkový hydrogram

Volba metody transformace přímého odtoku je klíčovou součástí metodického postupu, neboť přímo určuje tvar vlny, a tím i velikost kulminačního průtoků. Jako transformační funkci povodí používá HEC-HMS jednotkový hydrogram. Obecný princip této metody je popsán např. v literatuře [5]. Pro naše podmínky používáme Clarkův jednotkový hydrogram, který je popsán těmito parametry [6]:

- T_c doba koncentrace [h]
- R transformační faktor povodí [hod], simulující dobu zdržení vody v povodí
- závislostí doby dobíhání z dílčí kumulativní plochy povodí při zasažené celé ploše povodí

Výpočet doby koncentrace je k dispozici několik vzorců, nejpoužívanější je vzorec SCS (Soil Conservation Service) pro odvození T_{LAG} (časový posun v hodinách mezi výskytem maxima příčinné srážky a výskytem kulminačního průtoků v počítaném závěrovém profilu povodí).

$$T_{LAG} = \frac{L^{0,8} (S + 1)^{0,7}}{1900\sqrt{Y}}, \text{ kde} \quad (1)$$

L délka údolnice k rozvodnici [feet]

S maximální retence povodí [inches]

Y průměrný sklon povodí [%]

Doba koncentrace T_C je poté odhadnuta jako $1,67 \cdot T_{LAG}$.

Pro určení koeficientu R existuje jen minimum výpočetních vzorců, zpravidla pro výpočet teoretické povodňové vlny na nepozorovaných povodích odhaduje velikost koeficientu R jako n -násobek doby koncentrace:

$$R = n \cdot T_C \quad [\text{hod}], \text{ kde} \quad (2)$$

hodnota „ n “ se nejčastěji pohybuje v intervalu $1,2 - 2$.

Závislost doby dobíhání na ploše povodí je spočítána jako:

$$AI = 1,414 \cdot T^{1,5} \quad \text{pro } 0 < T < 0,5 \quad (3)$$

$$1 - AI = 1,414 \cdot (1 - T)^{1,5} \quad \text{pro } 0 < T < 1 \quad (4)$$

AI kumulativní plocha jako zlomek celkové plochy povodí

T zlomek doby koncentrace T_C

Pořadnice této závislosti jsou následně provedeny na objem odtoku za sekundu pro jednotkový hydrogram efektivních srážek a interpolovány pro zadaný časový interval výpočtu (30 min, 1hod a pod). Výsledný translační hydrogram slouží jako vstup do procedury transformace odtoku na povodí za využití koeficientu R :

$$Q(2) = CA \cdot I + CB \cdot Q(1) \quad (5)$$

$$CA = \frac{\Delta t}{R + 0,5 \cdot \Delta t} \quad (6)$$

$$CB=1-CA \quad (7)$$

$$Q_{UNGR} = \frac{Q(1) + Q(2)}{2} \quad (8)$$

$Q(1)$ okamžitý průtok na konci časového intervalu Δt

$Q(2)$ okamžitý průtok na počátku časového intervalu Δt

I pořadnice translačního hydrogramu

Q_{UNGR} pořadnice jednotkového hydrogramu na konci časového intervalu Δt

Hydrologická transformace

Metoda CN křivek

Metoda CN křivek slouží k jednoduchému výpočtu odtoku při srážko-odtokové události na malých povodích. Srážka je rozdělena na ztráty a efektivní déšť podle čísla CN křivky, které reprezentuje vlastnosti povodí – půdní poměry, využití území (landuse) a předchozí vláhové podmínky. Použité vztahy jsou empirické, odvozené na základě analýzy dat z malých povodí v USA. Metoda se však uplatnila také v mnoha jiných zemích včetně České republiky.

Metoda byla vyvinuta americkou Službou na ochranu půd (*Soil conservation service*, metoda se označuje také jako *SCS CN*).[4]

Jak je uvedeno v literatuře [3] je hodnota celkového přímého odtoku vyvolaného příčinnou srážkou funkcí hodnoty kumulativní srážky, způsobem využití území, vlastností půdního pokryvu a předchozího nasycení půdního profilu. Pro výpočet je použita následující rovnice:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (9)$$

P_e akumulovaná hodnota přímého odtoku v mm za časový interval t

P akumulovaná hodnota srážky v mm za časový interval t

I_a počáteční ztráta ze srážkového úhrnu v mm

S maximální potenciální retence, schopnost povodí vstřebat a udržet srážkový úhrn

Z analýzy výsledků z mnoha malých experimentálních povodí odvodila SCS empirický vztah pro výpočet počáteční ztráty:

$$I_a = 0,2 \cdot S \quad (10)$$

z toho vyplývá, že hodnota přímého odtoku za čas t je:

$$P_e = \frac{(P - 0,2 \cdot S)^2}{P + 0,8 \cdot S} \quad (11)$$

Výsledný přímý odtok je počítán jako rozdíl mezi přímým odtokem na konci a na začátku časového intervalu.

Maximální retenční kapacita povodí vychází z průměrného čísla CN a je vypočtena pomocí vztahu:

$$S = \frac{1000 - 10 \cdot CN}{CN} \quad [\text{inches}] \quad (12)$$

nebo

$$S = \frac{25400 - 254 \cdot CN}{CN} \quad [\text{mm}] \quad (13)$$

Hodnota CN se pohybuje v rozsahu (0-100) pro dané povodí. Hodnota blízká 100 je u téměř nepropustných povodí. Běžné hodnoty se pohybují v rozmezí 55 - 85. Přednost metody CN-křivek je jednoduchost jejího použití a průhlednost metodických postupů, mezi nedostatky patří nerespektování změn odtokových podmínek při různých intenzitách deště tj. při stejném celkovém úhrnu metoda počítá stejnou odtokovou ztrátu bez ohledu na časové rozložení deště, a rozpor z klasickou teorií nenasyceného proudění. Vzhledem k nenáročnosti na vstupní data, která jsou již dostupná v podobě GIS vrstev, je tato metoda vhodná pro odhad velikosti přímého odtoku na nepozorovaných povodích.[6]

Hydraulická transformace

Za situace, kdy je hydrologický model sestaven z více prvků reprezentujících povodí, vznikají v modelu prvky představující říční úseky. V těchto úsecích je nutné simulovat postup vlny po toku. HEC-HMS pro tyto účely nabízí metodu Muskingum a Muskingum-Cunge. Metoda je založena na aproximaci kombinace rovnice kontinuity a difúzní formy momentové rovnice a je podrobně popsána v manuálu [4].[6]

Metoda Muskingum

Tato metoda je využívána v takových situacích, kdy nejsou k dispozici žádná data ani hrubé podklady o tom jak vypadá říční koryto, tzn. materiál dna pro určení Manningova součinitele drsnosti, geometrie říčního koryta pro zjištění vstupních parametrů do výpočetních rovnic a jiné. Aby mohlo být použito této výpočtové metody, neměla by mít na transformaci povodňové vlny vliv inundace. Metoda vychází ze vztahu (14) založeného na bilanci odtoku a přítoku do daného úseku říčního koryta.

$$S = K * [X * I + (1 - X) * O] \quad (14)$$

S zadržený objem v říčním úseku [m^3]

K čas postupu povodňové vlny říčním úsekem [hod]

I průměrný přítok do říčního úseku [m^3/s]

O průměrný odtok z říčního úseku [m^3/s]

X transformační faktor, $<0;0,5>$ [-]

Transformační faktor X nabývá hodnot 0 až 0,5. Hodnota 0,5 značí maximální retenci říčního úseku a volí se pro říční úseky velmi mírných sklonů. Pro úseky s velkými sklony se hodnota faktoru X blíží nule, tzn. říční úsek nemá žádnou transformační schopnost. Obvykle se X volí blízké hodnotě 0,2.

Další veličinou, která je potřeba odhadnout je člen K , jež značí čas postupu vlny daným říčním úsekem. Délku daného úseku jsme schopni odečíst v programu GIS, ať už pomocí atributové tabulky nebo funkcí vlastnosti. Rychlost postupu vlny se pohybuje

v rozmezí 1-2 m/s, nejčastěji 1-1,5 m/s. Z těchto dvou předpokladů lze vcelku snadno dopočítat čas postupu povodňové vlny zvoleným říčním úsekem.

I když je tato metoda nenáročná na přesnost vstupních dat dává velmi slušné výsledky a v praxi se s touto metodou můžeme velmi často setkat.

Metoda Muskingum-Cunge

Pro zvolení této metody je třeba znát základní vlastnosti říčního koryta, je možné použít zaměřených příčných profilů. V případě, že tyto data nemáme k dispozici je tu možnost parametry v daném úseku odhadnout na základě informací z pochůzky v zájmovém území. Metoda vychází ze zákona zachování hmotnosti a difúzní formy momentové rovnice. Parametry vstupujícími do výpočtu jsou: délka říčního úseku, průměrný sklon, průměrný Manningův součinitel drsnosti a geometrie koryta. Příčný profil lze zadávat pěti různými způsoby: trojúhelník, kruh, obdélník, lichoběžník a osmi body. Při zvolení kruhu není možné počítat s tlakovým prouděním, pouze s prouděním s volnou hladinou uvnitř trubního vedení. Při zadání geometrie volbou osmi bodů je možno pro bermu a obě kynety volit různý součinitel drsnosti dle Manninga.

Výhody a nevýhody metody podle [6]:

- parametry modelu mají fyzikální základ,
- dává dobré výsledky v porovnání s modely s plně aplikovanými rovnicemi neustáleného proudění,
- řešení nezávisí na zadaném výpočetním intervalu,

Nevýhody:

- nepočítá ze zpětným vzdutím,
- diverguje za situace prudkého vzestupu vlny a relativně malého sklonu koryta (0,0003).

Transformace povodňové vlny pomocí nádrže

Program HEC-HMS nabízí tři typy výpočtu transformace povodňové vlny pomocí vodní nádrže. První způsob je pomocí výtokové funkce, kde základní vstupní informace tvoří čára zatopených ploch, čára zatopených objemů a funkce znázorňující závislost polohy hladiny vody v nádrži na odtoku z nádrže (Q-h křivka nádrže). Další dvě metody jsou podrobně popsány v manuálu [4].

Metoda výtokové funkce

Jak už bylo zmíněno, hlavními vstupními hodnotami jsou funkce reprezentující transformační vlastnosti nádrže v závislosti na hloubce vody v nádrži. V programu je možnost si vybrat, jestli budeme zadávat jako vstupní údaj čáru zatopených ploch nebo objemů. Jelikož lze v programu GIS snadno určit obsah požadované plochy nabízí se využít první možnosti. Čára zatopených objemů se posléze automaticky dopočítá v závislosti na čáře zatopených ploch. Jako další vstupní funkci je zapotřebí zadat závislost polohy vody v nádrži na výtoku z nádrže, tzn. Q-h křivku nádrže. Při sestavování této funkce bylo použito vzorce pro výtok vody otvorem:

$$Q = S * \mu \sqrt{2gH} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (15)$$

S obsah otvoru, kterým vytéká voda [m^2]

μ součinitel ztrát pro výtok otvorem [-]

g gravitační zrychlení [m/s^2]

H poloha hladiny vody [m]

Pro výpočet součinitele ztrát μ platí vzorec:

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{1 + \sum \xi_i}} \quad [-] \quad (16)$$

$\sum \xi_i$ suma veškerých ztrát

Po dosažení hrany bezpečnostního přelivu pokračovala křivka nádrže po trajektorii, již reprezentuje vzorec pro přepad přes přelivnou hranu:

$$Q = m * b_0 * \sqrt{2g} * h^{\frac{3}{2}} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (17)$$

m přepadový součinitel [-]

b_0 účinná šířka přelivu [m]

h výška přepadového paprsku [m]

Pro výpočet účinné šířky přelivu byl použit vzorec:

$$b_0 = b - 2K_v h \quad [\text{m}] \quad (18)$$

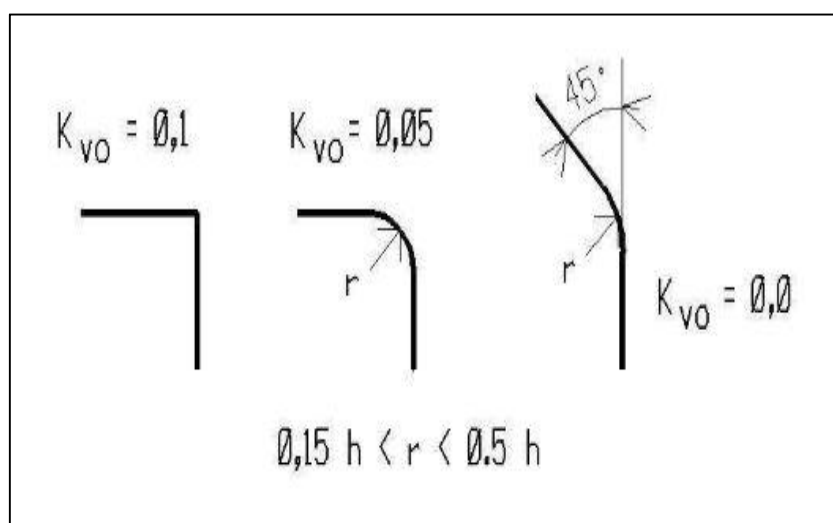
b šířka přelivné hrany bez bočních kontrakcí [m]

K_v součinitel vtoku [-]

,kde

$$K_v = \frac{b * K_{v0}}{b + h} \quad [-] \quad (19)$$

K_{v0} součinitel vtoku, viz. obr. 4 [-]



Obr. 4 Závislost tvaru vtokové hrany na součiniteli vtoku K_{v0}

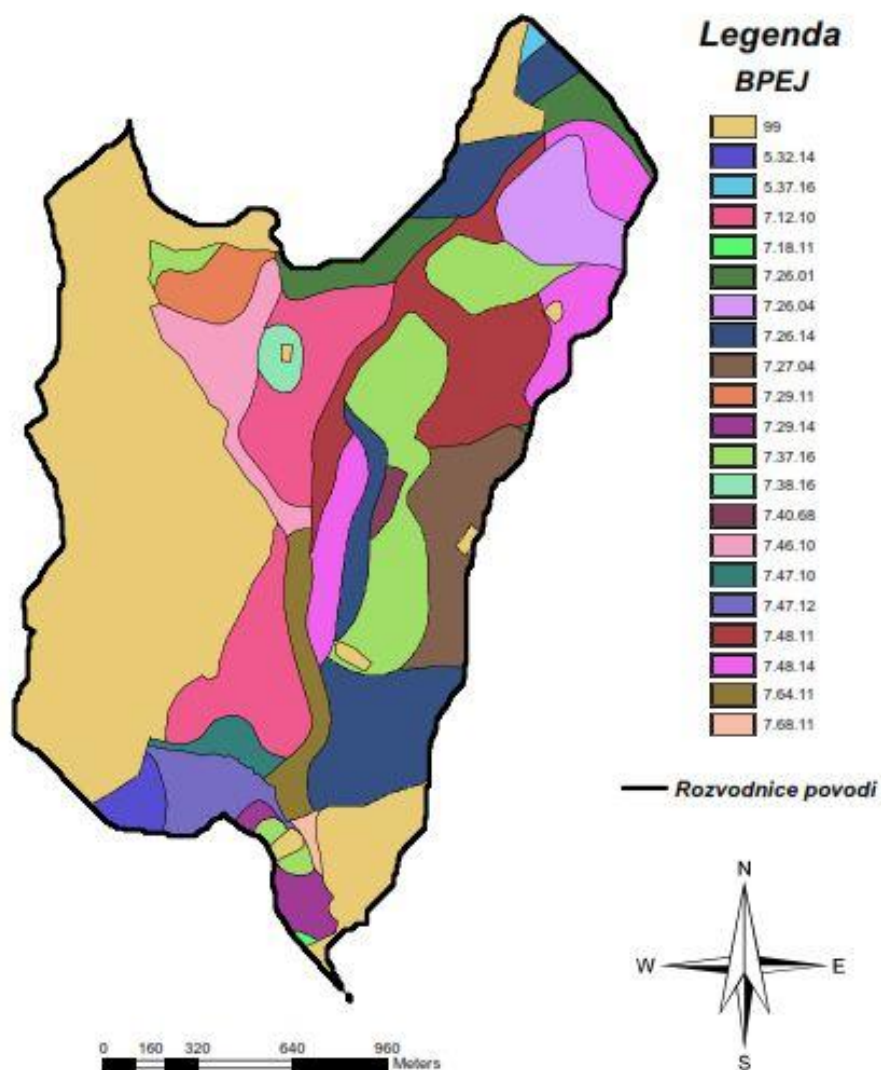
VSTUPNÍ DATA

Vlastnosti půdního profilu

Retenční schopnosti povodí nezáleží jen na makroskopických ukazatelích, ale rovněž na mikroskopickém složení zemin, které svou schopností zadržovat a uchovávat vodu v půdním profilu, přispívají k celkové retenční schopnosti celého povodí. Tyto vlastnosti jsou zastoupeny kódem BPEJ (bonitovaná půdně ekologická jednotka). Vlastnost každého druhu zeminy je v tomto systému reprezentována pětimístným kódem. Každé číslo nebo dvojčíslí vyjadřuje jistou charakteristiku dané půdní jednotky, jež znázorňuje následující odstavec:

- První číslice kódu BPEJ značí příslušnost ke klimatickému regionu (označeny kódy 0 - 9). Klimatické regiony byly vyčleněny na základě podkladů Českého hydrometeorologického ústavu v Praze výhradně pro účely bonitace zemědělského půdního fondu (ZPF) a zahrnují území s přibližně shodnými klimatickými podmínkami pro růst a vývoj zemědělských plodin. V ČR bylo vymezeno celkem 10 klimatických regionů. [4]
- Druhá a třetí číslice vymezuje příslušnost k určité hlavní půdní jednotce (01 - 78). Hlavní půdní jednotka je účelové seskupení půdních forem, příbuzných ekologickými vlastnostmi, které jsou charakterizovány morfogenetickým půdním typem, subtypem, půdotvorným substrátem, zrnitostí a u některých hlavních půdních jednotek výraznou svažitostí, hloubkou půdního profilu, skeletovitostí a stupněm hydromorfismu. [4]
- Čtvrtá číslice stanoví kombinaci svažitosti a expozice pozemku ke světovým stranám. [4]
- Pátá číslice určuje kombinaci hloubky půdního profilu a jeho skeletovosti. [4]

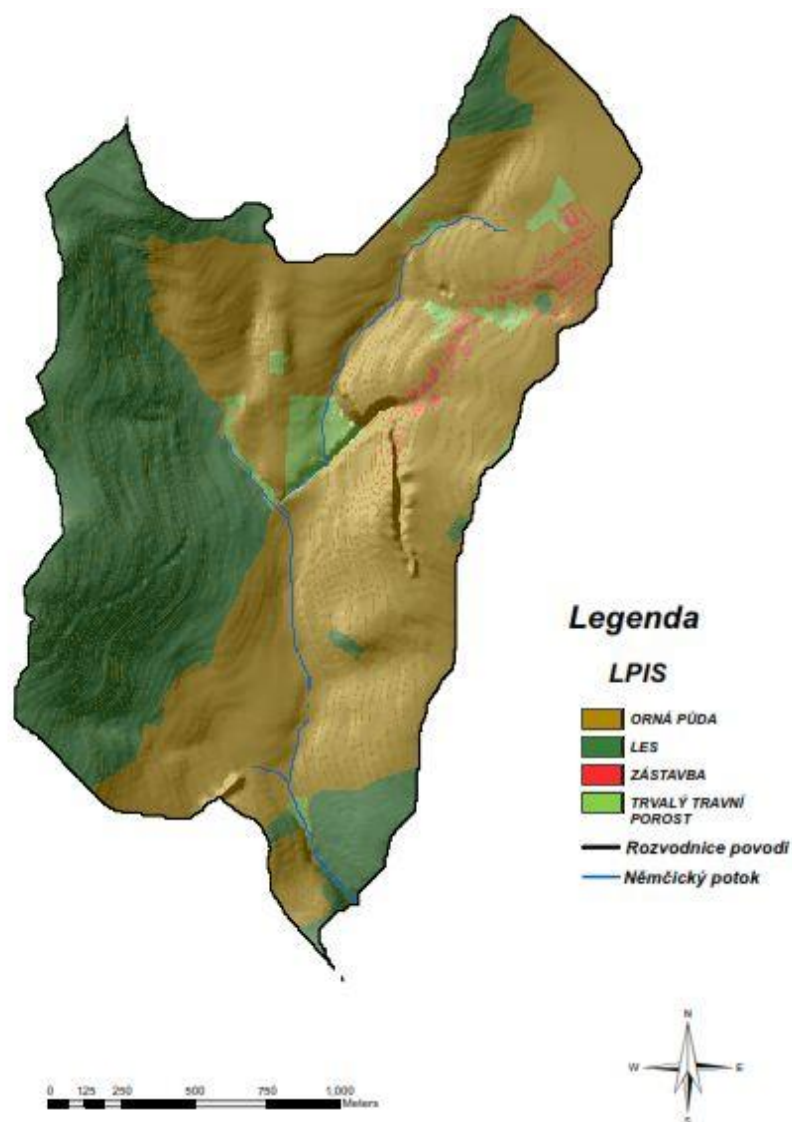
Na následujícím obrázku je zobrazena mapa BPEJ v zájmovém území Němčického potoka.



Obr. 5 Mapa bonitovaných půdně ekologických jednotek BPEJ v zájmové oblasti

Využití parcel LPIS

Dalším faktorem podílejícím se na transformaci příčinných srážek spadlých na dané povodí je způsob využití jednotlivých parcel. Různým způsobem se voda chová pokud dopadne na zpevněný povrch, kde nemá téměř žádnou možnost infiltrace a rychle z dané oblasti odtéká, nebo dopadne-li do zalesněné oblasti, kde dochází k infiltraci, evaporaci, transpiraci, povrchové retenci a dalším jevům, které vodu v dané oblasti zadržují. Ta je potom v krajině k dispozici po delší časovou dobu a nepodílí se tak na vytváření kulminačních průtoků v období bezprostředně po srážkové události. Pro vytvoření mapy CN čísel byla jako podklad použita mapa LPIS znázorněná na obr. 6.

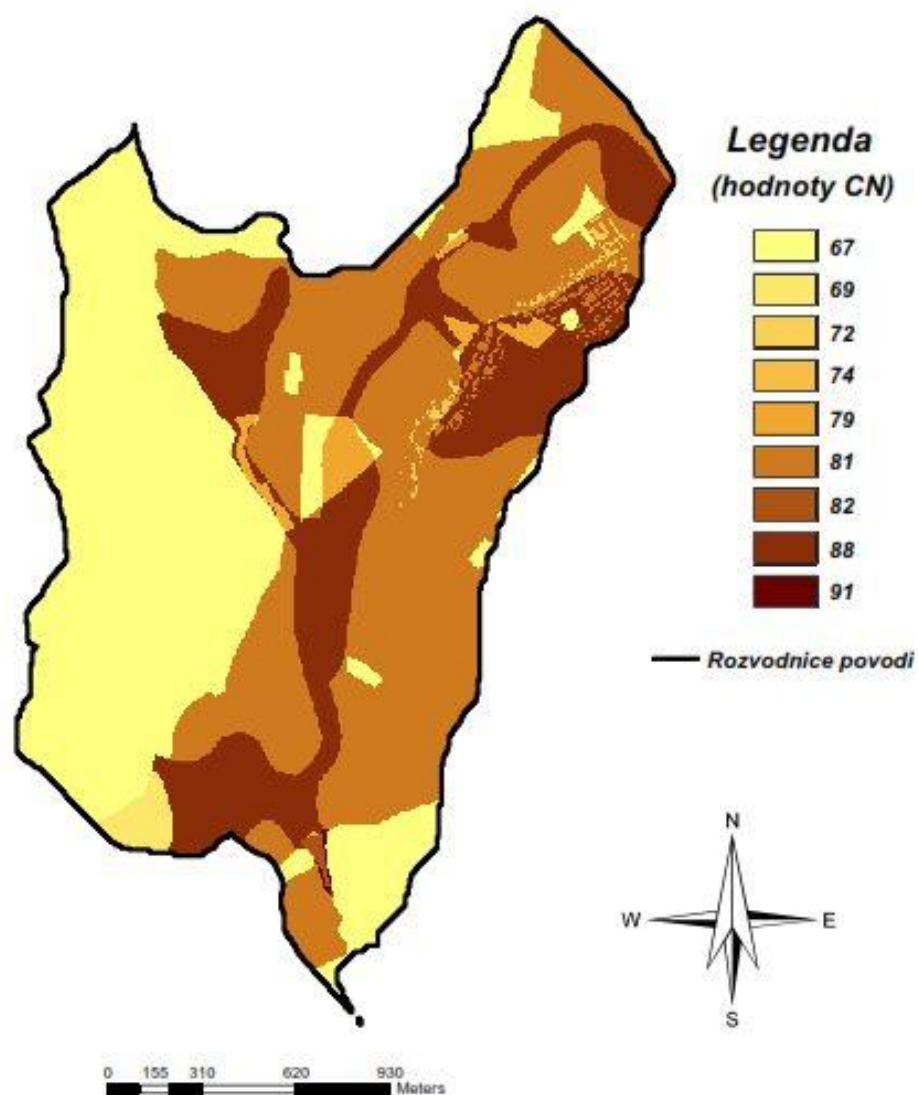


Obr. 6 Mapa využití parcel v zájmovém území Němčického potoka

Jelikož použitý model počítá hydrologickou transformaci srážky metodou SCS CN, bylo zapotřebí vytvořit právě mapu CN křivek. Ta vznikla kombinací map BPEJ a LPIS. Z informace BPEJ je hlavním faktorem pětímístného kódu druhá a třetí číslice, jež zastupuje hlavní půdní jednotku (HPJ) a která poté určuje hydrologickou skupinu půd (HSP). Kombinací HSP a LPIS pomocí tab. 1 dostaneme mapu CN čísel zobrazenou na obr. 7.

Tab. 1 Ukázka tabulky pro určení CN čísla[7]

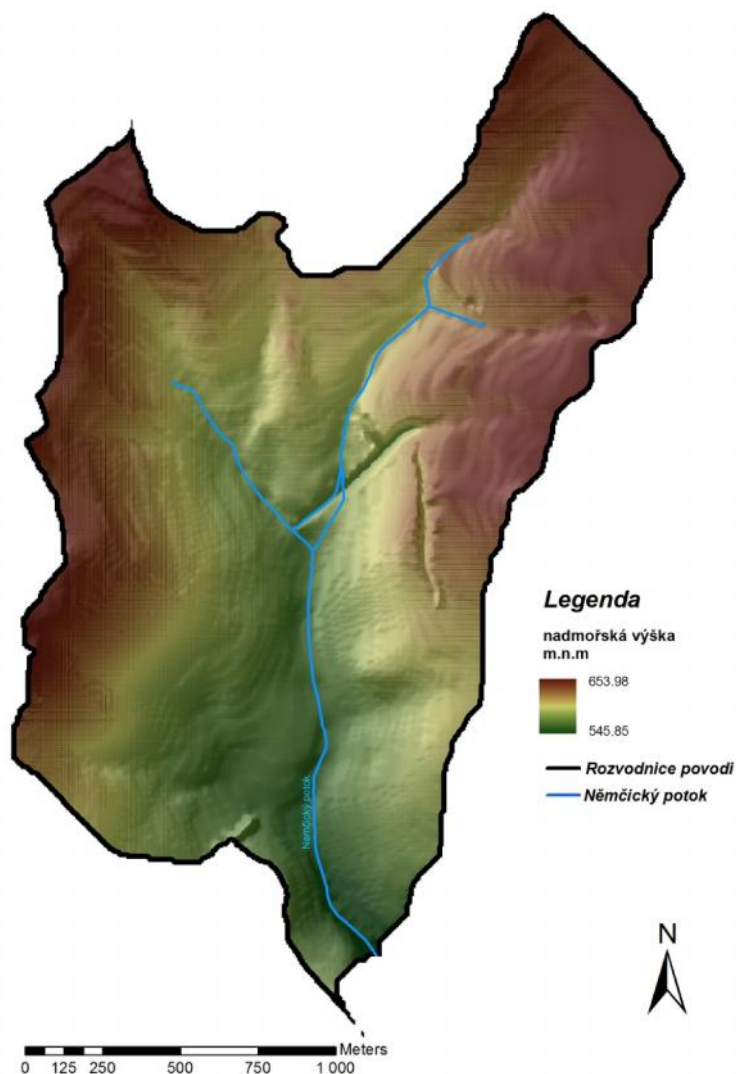
CN				HSP				
				A	B	C	D	N
LPIS	2	lpis - orná půda	R	72	81	88	91	83
	3	lpis - chmelnice	C	72	81	88	91	83
	4	lpis - vinice	V	72	81	88	91	83
	6	lpis - ovocný sad	S	72	81	88	91	83
	7	lpis - travní porost	T	49	69	79	84	70
	9	lpis - jiná kultura	O	59	74	82	86	72
	99	lpis - zalesněno	L	45	66	77	83	67
lesy	21	les - porost bez rozlišení	LPOR	36	60	73	79	62
	22	les - bezlesí	LBEZ	45	66	77	83	68
	23	les - jiné pozemky (většinou lesní cesty)	LJIN	59	74	82	86	76
	24	les - ostatní	LOST	45	66	77	83	68
	26	les - porost st.1-dobré podm.	LPOR1	30	55	70	77	58



Obr. 7 Mapa CN čísel vytvořená v programu GIS

Topologie území

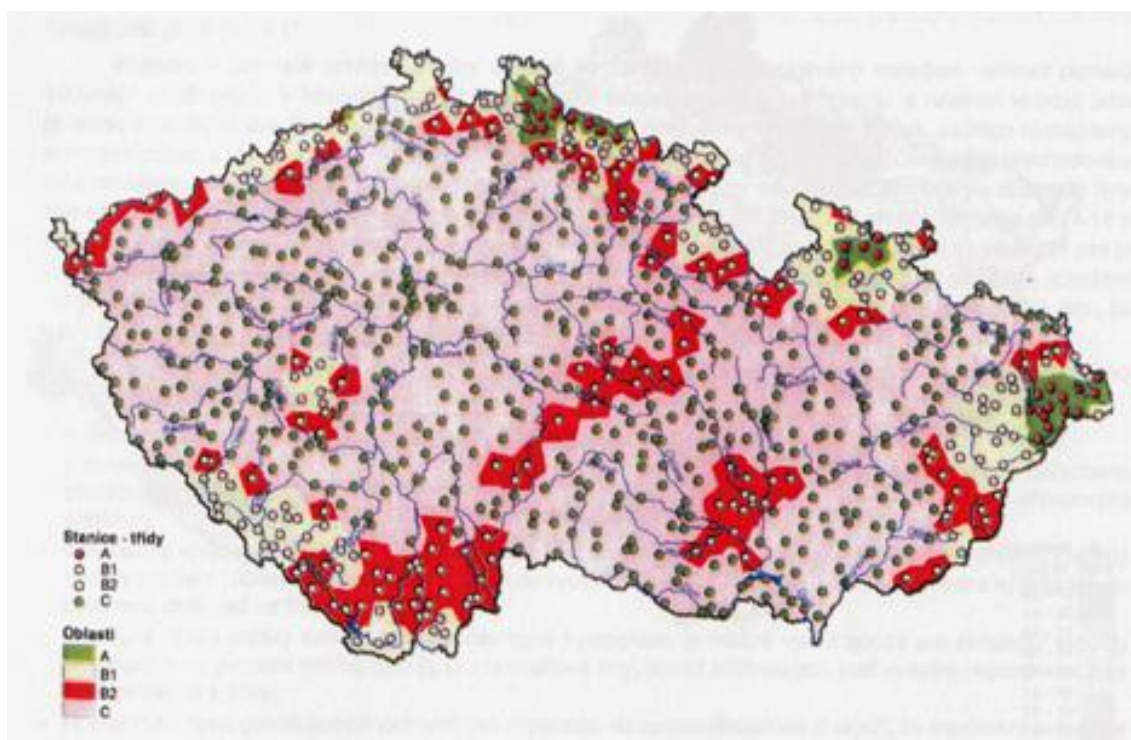
Jedním z nejdůležitějších vstupních parametrů srážko-odtokového modelování jsou data popisující topologii a reliéf terénu zájmového povodí. V našem případě jej tvoří digitální model terénu (DMT). Jedná se o digitální zpracování prostorových geografických informací a geometrického popisu terénu. Využívá kombinaci 2D dat s atributem 3. rozměru (z-souřadnice). Zdrojem dat jsou pozemní měření (geodetická měření), dálkový průzkum Země (fotogrammetrie, radarové snímání), digitální a analogová data (ZABAGET) a další[7]. DMT experimentálního povodí byl vytvořen ze souboru *.dgn, který obsahoval polygony vrstevnic s nadmořskými výškami ve 3D a byl ořezán rozvodnicí povodí Němčického potoka s uzavěrovým profilem, který byl měrným profilem. Celé povodí bylo rozděleno v prostředí HEC-GeoHMS na pět subpovodí.[8]



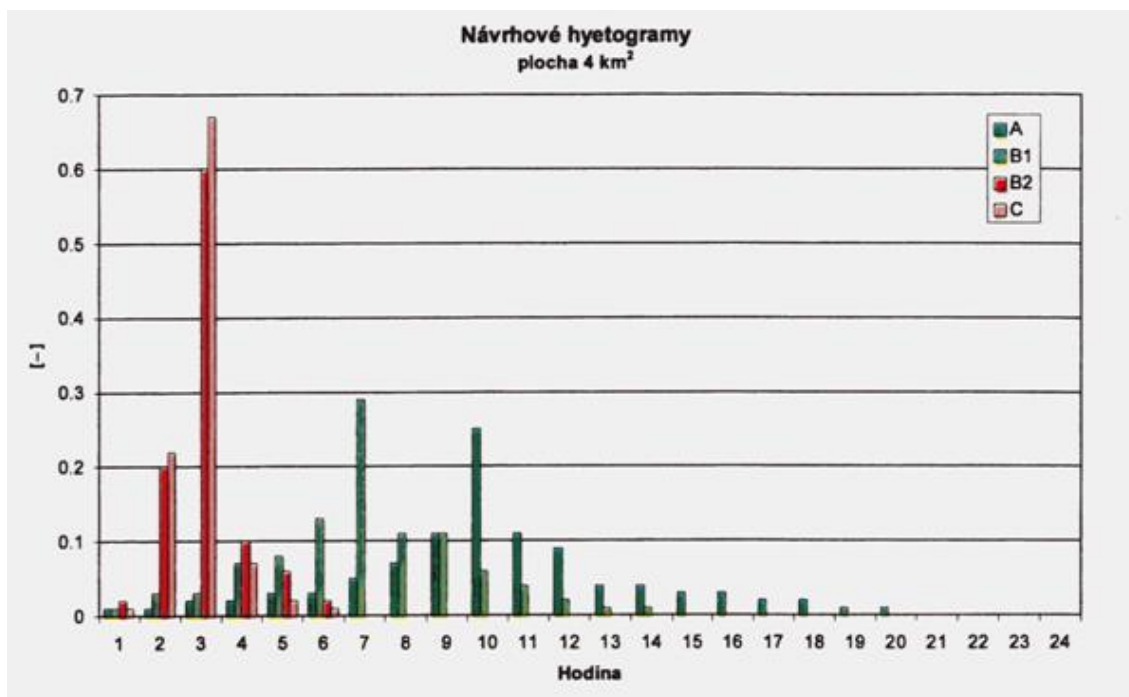
Obr. 8 Digitální model terénu vytvořený v programu GIS

Srážky

Hlavní vstupním parametrem při srážko-odtokovém modelování jsou srážky. Pro povodí Němčického potoka to byla data naměřená v klimatické stanici Rájec–Němčice (úhrn spadlých srážek v intervalech 15 nebo 30 minut). Pro odvozování hydrogramu s průměrnou dobou opakování $N=100$ let to byla hodnota maximálního 1-denního srážkového úhrnu s průměrnou dobou opakování $N=100$ let ($H_{S\ 24,\ 100}$), která činila pro stanici Sloup, okr.Blansko 84,8 mm. Při modelování bylo využito předpokladu používaného v praxi v rámci řešení srážko-odtokového modelu na malých a velmi malých povodích, kde nejsou k dispozici hydrologická měření. Tento předpoklad počítá s tím, že příčinná srážka s průměrnou dobou opakování N vyvolá kulminační průtok se stejnou dobou opakování. To znamená, že srážka s dobou opakování 100 let vyvolá stoletý kulminační průtok. Pro vytvoření hydrogramu povodně s kulminačním průtokem Q_{100} byly použity dvě metody. V obou bylo k vymodelování použito hodnot maximálních 1-denních srážkových úhrnů s průměrnou dobou opakování $N=100$ let. V prvním případě byl denní úhrn srážek rozdělen podle návrhového hyetogramu pro plochu povodí 4 km² (oblast B2), který je uveden v literatuře[9] viz. Obr. 9 a 10. V druhém případě bylo časové rozložení srážek konstantní. Doba trvání deště byla rovna době koncentrace.[8]



Obr. 9 Charakteristické oblasti na území ČR lišící se tvarem návrhového hyetogramu [9]



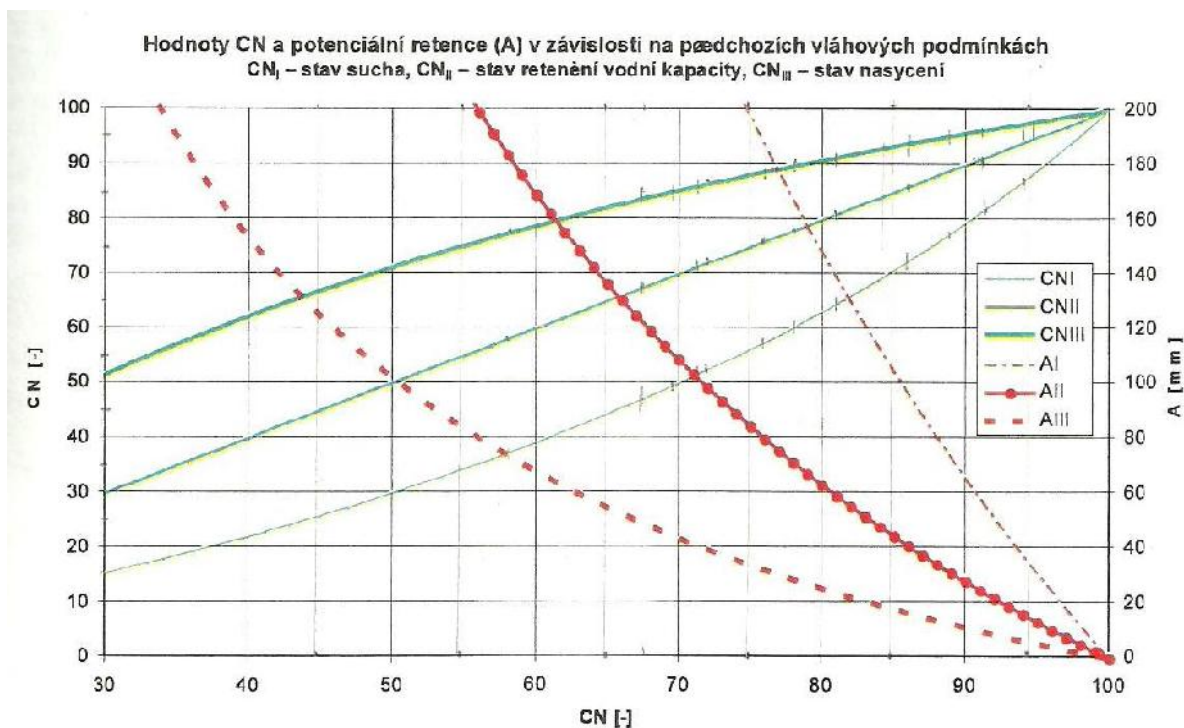
Obr. 10 Návrhové hyetogramy pro povodí o ploše 4 km² [9]

Vlhkostní podmínky

Při srážkové události hraje velkou roli nasycení půdního profilu vodou, to také ovlivňuje celkovou odezvu povodí na příčinnou srážku. Jinak se chová povodí, pokud v něm několik dní nepršelo a jinak povodí s několik dní trvajícím deštěm. V mnoha programech (např. HYDROG) je tato situace ošetřena indexem předchozí srážky. V našem případě byla tato situace vyřešena změnou CN čísel v závislosti na vlhkostních podmínkách půdního profilu. Byly uvažovány tři hlavní stavy nasycení: nízká nasycenost půdního profilu CN I, průměrná nasycenost půdního profilu CN II a nasycený půdní profil CN III. Hodnoty vycházeli z nomogramu na obr. 11 nebo je možné jejich hodnotu určit analyticky pomocí vztahů (19), (20).

$$CN_I = \frac{CN_{II}}{2,281 - 0,01281 * CN_{II}} \quad (20)$$

$$CN_{III} = \frac{CN_{II}}{0,427 + 0,00573 * CN_{II}} \quad (21)$$



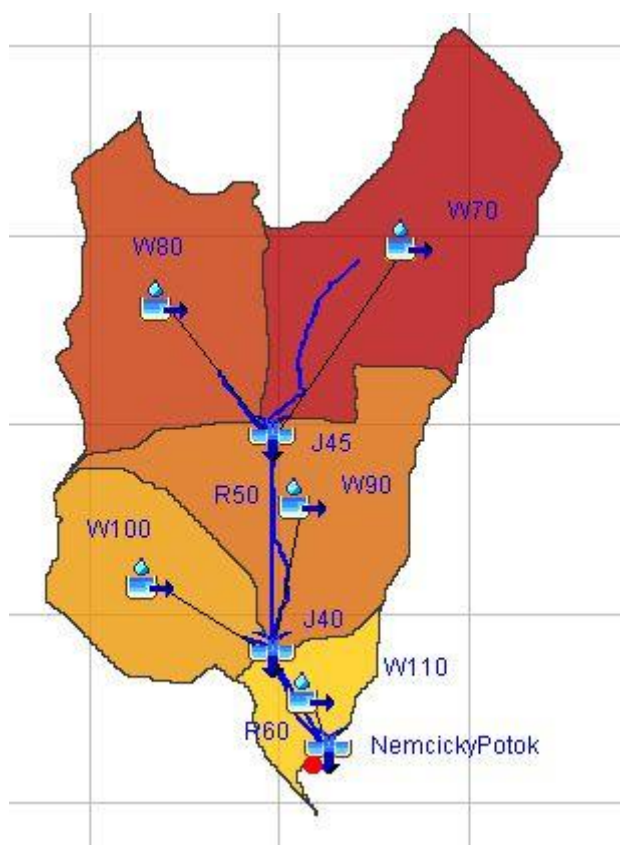
Obr. 11 Závislost hodnot CN a potenciální retence ve vztahu k předchozím vláhovým podmínkám [9]

SESTAVENÍ SRÁŽKO-ODTOKOVÉHO MODELU

V rámci řešení srážko-odtokové situace v povodí Němčického potoka, bylo potřeba provést určitou schematizaci povodí pro program HEC-HMS. Tato schematizace probíhala v prostředí GIS s použitím nadstavby HEC-GeoHMS. Díky této aplikaci bylo základní povodí rozděleno na pět menších subpovodí a byly vypočítány jejich hlavní charakteristiky (průměrné CN číslo, sklonitost, doba koncentrace, atd.). Na následujících dvou obrázcích je ukázáno, jak probíhala schematizace experimentálního povodí.



Obr. 12 Povodí Němčického potoka



Obr. 13 Schematizace povodí v programu HEC-HMS

KALIBRACE MODELU

Pro další práci s vytvořeným srážko-odtokovým modelem je zapotřebí, aby došlo k ověření, zda sestavený model pracuje správně a jeho výstupy se blíží reálným hodnotám. K tomu účelu slouží kalibrace modelu. Jelikož bylo k dispozici měření kulminačních průtoků a srážek v závěrovém profilu povodí [VÚMOP Brno] a měření srážek v klimatické stanici Rájec–Němčice, byla tak k dispozici data pro kalibraci modelu. Kalibrace modelu nebyla nijak jednoduchá. K dispozici byl totiž pouze omezený počet údajů o kulminačních průtocích a to z let 2005-2009 a především chybělo spojitě vykreslení hydrogramu povodně. Na místo toho byl k dispozici pouze záznam o velikosti kulminačního průtoku a dni, ve kterém byl naměřen. Naměřené údaje v uzávěrovém profilu ne vždy odpovídaly údajům, naměřeným ve srážkoměrné stanici Rájec–Němčice, viz. žlutě vyznačené dny, občas data ze srážkoměrné stanice chyběla úplně (dny označené červenou barvou). Ke kalibraci tak byla použita data vyznačená zeleně. Ukázka analýzy naměřených údajů je uvedena v tabulce 2.



Obr. 14 Měrná stanice v závěrovém profilu experimentálního povodí





Obr. 15 Ostrohranný měrný přepad s infračerveným snímáním hladiny


Tab. 2 Maximální průtoky a transport látek během stoupající vlny extrémních srážko-odtokových situací v povodí Němčického potoka[VÚMOP, v.v.i.]


Rok	Datum	Profil	Průtok	Srážky		Objem			
			Q _{max} [l/s]	Úhrn [mm]	Max. intenzita [mm/min]	NO ₃ ⁻ [kg]	NO ₂ ⁻ [kg]	PO ₄ ³⁻ [kg]	Nerozp. látky [kg]
2005	23.5.	N1	161,10	5,50	0,80	1,98	0,09	1,28	921,96
		N2	163,00			2,09	0,03	0,51	771,95
	15.8.	N1	96,30	19,12	0,21	2,13	0,07	0,60	12,38
		N2	94,60			1,64	0,12	0,66	28,41
	12.9.	N1	1121,80	76,68	1,75	12,22	1,26	2,78	27350,62
		N2	760,00			8,16	1,38	3,20	7262,05
	29.9.	N1	119,50	32,80	0,29	3,66	0,02	0,15	20,67
		N2	113,10			3,32	0,10	0,20	4,19
2006	29.3.	N1	1153,00	26,1 tání sněhu	0,15	4981,71	13,78	67,65	145369,71
		N2	1110,30			5194,93	34,56	64,16	131616,51
		N3				5159,20	23,56	68,32	209323,42
	1.5.	N1	377,50	69,30	0,05	1697,49	4,19	5,85	17797,29
		N2	281,50			1140,88	4,28	8,56	14974,11
		N3				631,56	6,72	23,02	2037,29
	22.6.	N1	113,10	19,90	0,66	2,69	0,00	0,18	3,17
		N2	107,30			3,13	0,22	0,30	8,76
		N3				6,31	0,16	0,38	3,83
	7.8.	N1	959,90	198,80	0,85	231,47	2,35	9,51	8894,39
		N2	743,70			109,96	3,83	14,68	5292,46

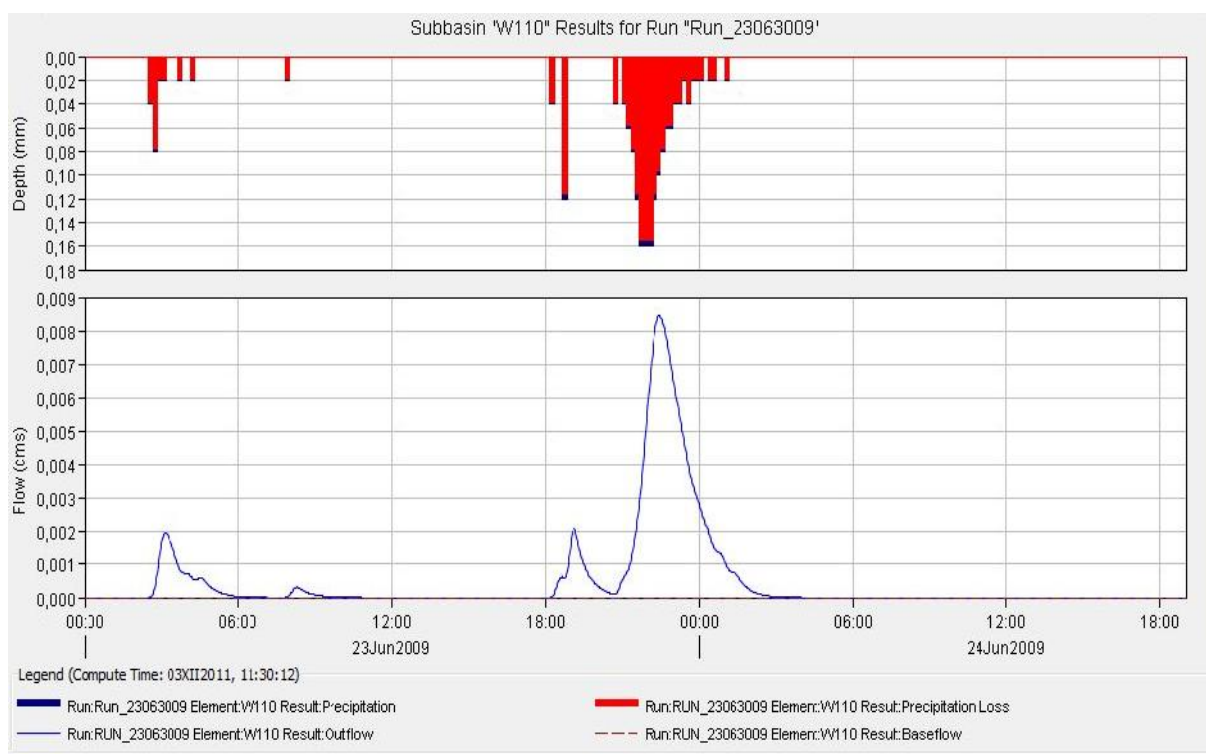
2007	24.3.	N3		11,30	0,10	118,86	6,04	9,21	3575,31
		N1	369,70			699,73	1,98	6,76	5706,97
		N2	239,60			415,76	1,90	9,27	1069,09
		N3				403,88	1,78	9,38	415,76
	6.6.	N1	161,20	34,60	1,30	1,22	0,18	0,23	108,18
		N2	152,50			1,95	0,31	0,30	33,06
		N3				2,44	0,18	0,39	49,57
	22.6.	N1	129,20	33,30	0,60	0,60	0,13	0,37	38,62
		N2	119,40			1,50	0,15	0,42	30,06
		N3				2,00	0,18	0,30	42,40
	21.7.	N1	312,40	8,00	0,80	17,17	0,04	0,91	82,33
		N2	266,70			14,56	0,06	0,81	94,61
		N3				14,90	0,04	0,81	105,92
	20.8.	N1	68,50	31,65	1,20	2,56	0,35	0,53	13,32
		N2	227,10			13,77	0,59	1,84	15,72
		N3				0,00	0,00	0,02	0,00
	6.9.	N1	214,00	10,50	0,20	362,06	9,69	10,90	3626,43
		N2	168,90			138,79	11,66	20,48	1240,59
		N3				159,52	16,12	14,18	2035,83
	23.10.	N1	62,60	2,00	0,10	2,94	0,02	0,20	23,09
		N2	55,30			3,06	0,16	0,11	5,01
		N3				3,45	0,07	0,38	5,48
	23.11.	N1	177,00	8,34	0,10	509,39	5,81	7,80	3204,70
		N2	129,20			133,12	8,77	3,95	911,06
		N3				521,52	3,54	4,43	531,36
2008	1.3.	N1	108,50	1,92	0,10	73,40	0,75	0,52	426,47
		N2	81,10			37,19	0,89	0,30	261,72
		N3				40,19	1,16	0,90	389,32
	22.4.	N1	130,80	12,64	0,21	19,17	0,39	1,17	526,01
		N2	99,00			5,79	0,22	0,27	62,14
		N3				0,00	0,00	0,21	0,00
	7.7.	N1	73,10	25,46	0,66	0,57	0,03	0,14	5,77
		N2	66,00			0,23	0,00	0,38	6,24
		N3				0,42	0,00	0,54	19,74
	12.7.	N1	90,80	28,59	0,37	2,86	0,29	0,63	79,54
		N2	111,50			5,12	0,57	1,19	96,77
		N3				4,88	0,53	1,24	135,35
	16.8.	N1	69,70	7,60	0,12	1,08	0,06	0,40	669,15
		N2	66,50			1,16	0,00	0,20	251,29
		N3				0,64	0,00	0,16	227,52
	15.9.	N1	49,50	26,00	0,06	6,89	1,01	0,93	72,95
		N2	90,20			11,18	0,67	1,37	64,86
		N3				9,57	0,27	3,52	23,84

 – data se neshodují s naměřenými srážkami

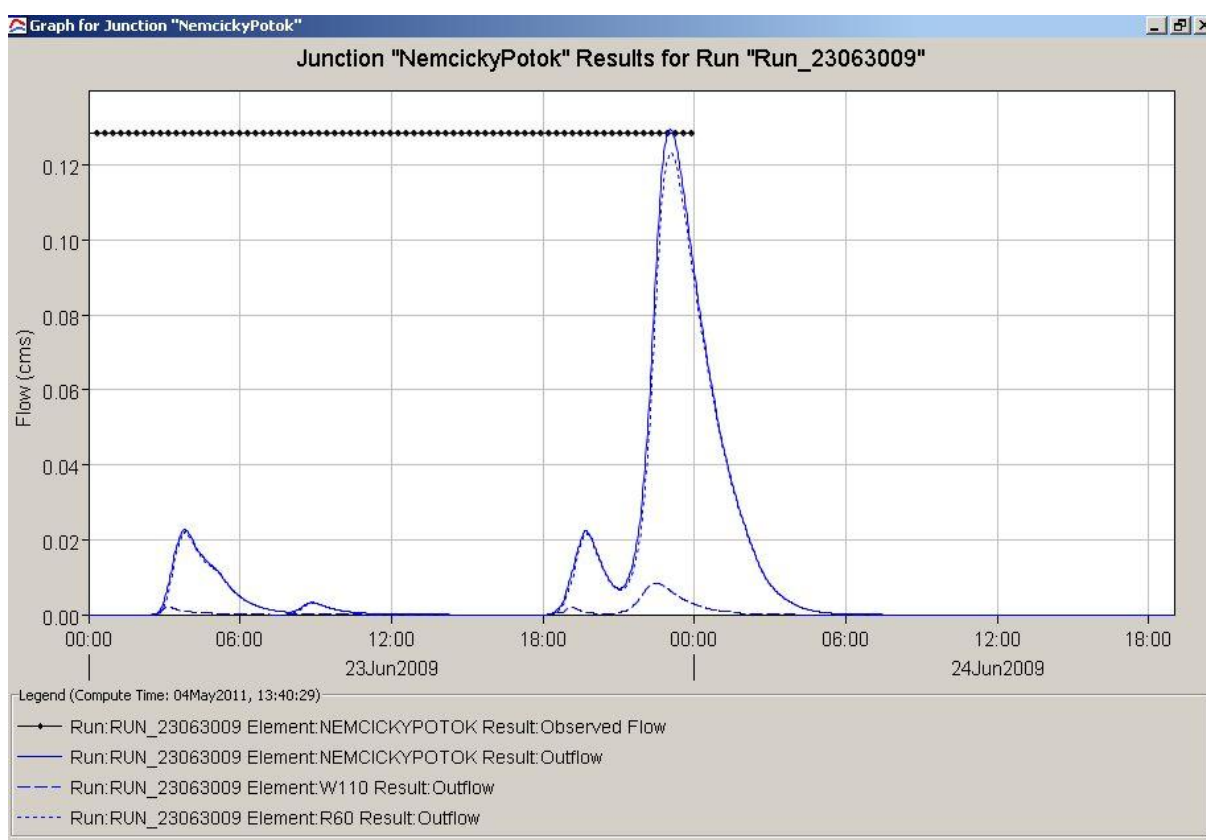
 – data chybí

 – data se shodují s naměřenými srážkami ze stanice Rájec-Němčice

 – na odtoku se nepodílely jen dešťové srážky, ale také tání sněhu

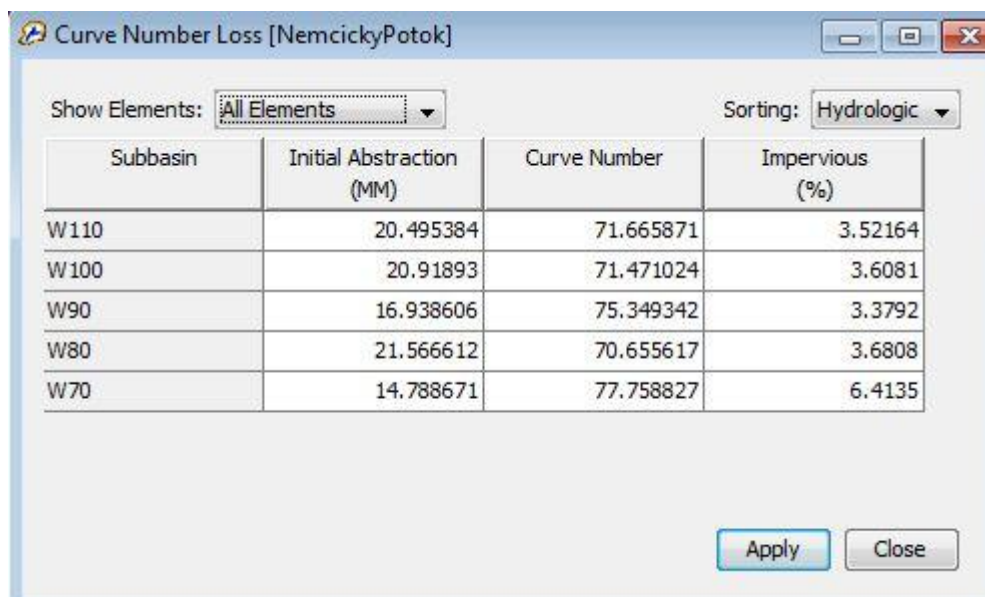


Obr. 16 Ukázka výstupu z programu HEC-HMS, nahoře příčinná srážka, dole hydrogram vyvolaný touto srážkovou událostí



Obr. 17 Ukázka hydrogramu v závěrovém profilu povodí, modrá barva je hydrogram vymodelovaný v programu HEC-HMS, černá čára znázorňuje hodnotu naměřeného kulminačního průtoku pomocí měrného přelivu

V tomto srážko-odtokovém modelu vytvořeném v programu HEC-HMS probíhala kalibrace parametrů ovlivňujících odtok manuálně. Jelikož bylo použito metody SCS CN, měnily se hodnoty počáteční ztráty (Initial Abstraction) a hodnoty CN čísel pro jednotlivá povodí. Změna hodnot probíhala v tabulkovém procesoru a pohybovala se v mezích CN I až CN III, tzn. od suchého půdního profilu po profil nasycený. Po každé změně CN čísla proběhl výpočet a porovnávaly se hodnoty pozorovaného a vypočteného kulminačního průtoku. Po dosažení uspokojivé shody byl výpočet ukončen.



Subbasin	Initial Abstraction (MM)	Curve Number	Impervious (%)
W110	20.495384	71.665871	3.52164
W100	20.91893	71.471024	3.6081
W90	16.938606	75.349342	3.3792
W80	21.566612	70.655617	3.6808
W70	14.788671	77.758827	6.4135

Obr. 18 Tabulka pro vkládání počáteční ztráty a CN čísla pro jednotlivá povodí

Tab. 3 Porovnání hodnot kulminačních průtoků naměřených ve vodoměrné stanici a vymodelovaných v programu HEC-HMS

		Naměřené hodnoty				HEC-HMS				procent. shoda
Rok	Datum měření	Q_{MAX} [l/s]	Q_{MAX} [m ³ /s]	Denní úhrn srážek [mm]	Max. intenzita [mm/h]	Q_{MAX} [m ³ /s]	Datum	Q_{MAX} [m ³ /s]	Datum	
2005	15.8.	96.3	0.0963	19.12	0.21	0.311	15.8. 2005 7:53			-222.9%
	12.9.	1121.8	1.1218	76.68	1.75	1.82	12.9. 2005 21:09			-62.2%
	29.9.	119.5	0.1195	32.8	0.29	0.486	29.9. 2005 10:59			-306.7%
2006	1.5.	377.5	0.3775	69.3	0.05	0.372	2.5. 2006 19:57	0.372	1.5. 2006 1:44	1.5%
	22.6.	113.1	0.1131	19.9	0.66	0.912	23.6. 2006 2:27	0.636	22.6. 2006 4:33	-706.4%
	7.8.	959.9	0.9599	198.8	0.85	21.858	7.8. 2006 15:43			-2177.1%
2007	24.3.	369.7	0.3697	11.3	0.1	0.451	20.3. 2007 15:07	1.222	24.3. 2007 9:33	-22.0%
		227.1	0.2271	31.65	1.2	0.926	20.8. 2007 16:47	Profil N2		-307.7%
2008	22.4.	130.8	0.1308	12.64	0.21	0.301	23.4. 2008 0:51			-130.1%
	7.7.	73.1	0.0731	25.46	0.66	0.662	8.7. 2008 14:53	0.225	7.7. 2008 23:31	-805.6%
2009	23.6.	128.7	0.1287	6	0.5	0.13	23.6. 2009 22:59			-1.0%
	3.7.	1187.7	1.1877	43	1.4	1.237	3.7. 2009 13:25			-4.2%
	15.7.	3378.5	3.3785	29.2	1.3	3.233	15.7. 2009 19:00			4.3%

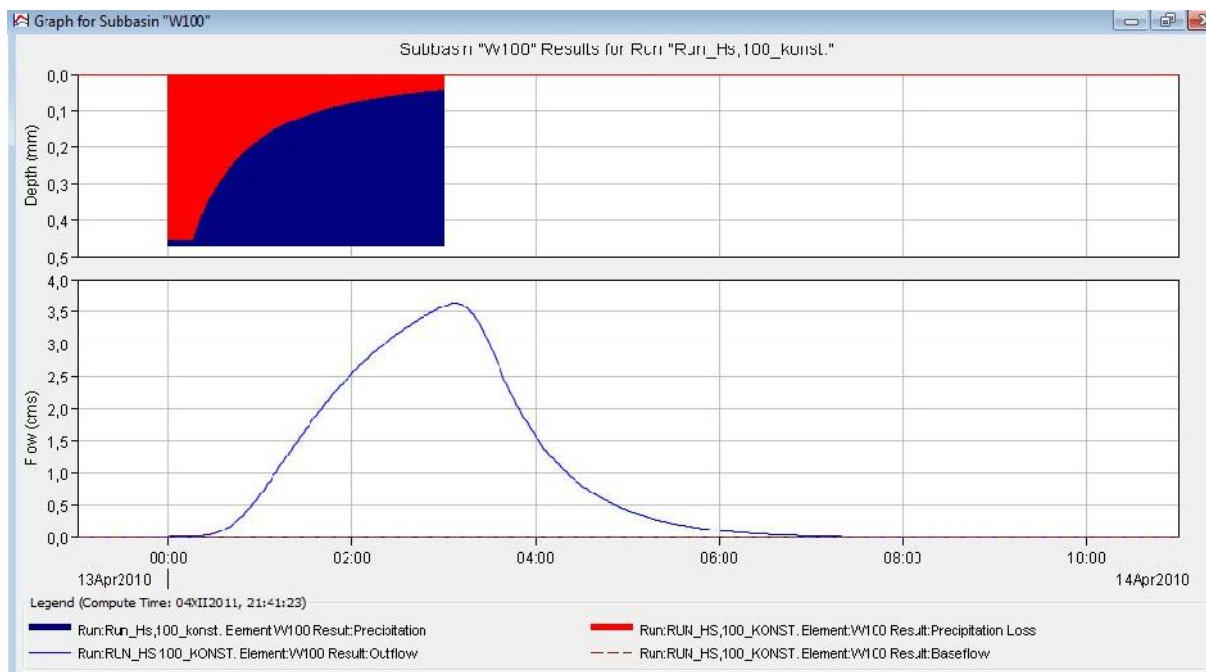
Výstupy z kalibrace ukázaly na problémy s naměřenými daty, více než 50% vstupních dat v podobě srážkových úhrnů se neshodovalo s údaji ze srážkoměrné stanice Rájec-Němčice nebo tyto údaje pro srovnání úplně chyběly. V některých případech je už od pohledu nevyrovnaný vztah mezi příčinnou srážkou a odtokem z povodí, kdy například dne 7. 8. 2006 byl naměřen 1-denní úhrn o velikosti 198,8 mm, což je více jak dvojnásobek 1-denního srážkového úhrnu s dobou opakování $N=100$ let. Tento však vyvolal kulminační průtok o velikosti nedosahujícího ani $1 \text{ m}^3/\text{s}$. Jak je patrné z následující tabulky došlo ke shodě v méně než 50% případech. Vzhledem k malému časovému trvání této práce nedošlo k podrobnému rozboru malé shody výsledků. S ohledem na ne úplnou spolehlivost vstupních dat je však z výsledku kalibrace patrné, že je model schopen vcelku věrohodně zachytit vztah mezi srážkovou událostí a následně vyvolanou odtokovou situací. Díky tomu bylo možno pokračovat s další analýzou, tentokrát už s použitím příčinné srážky $H_{24, 100}$.

POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ SRÁŽKO-ODTOKOVÉHO MODELU

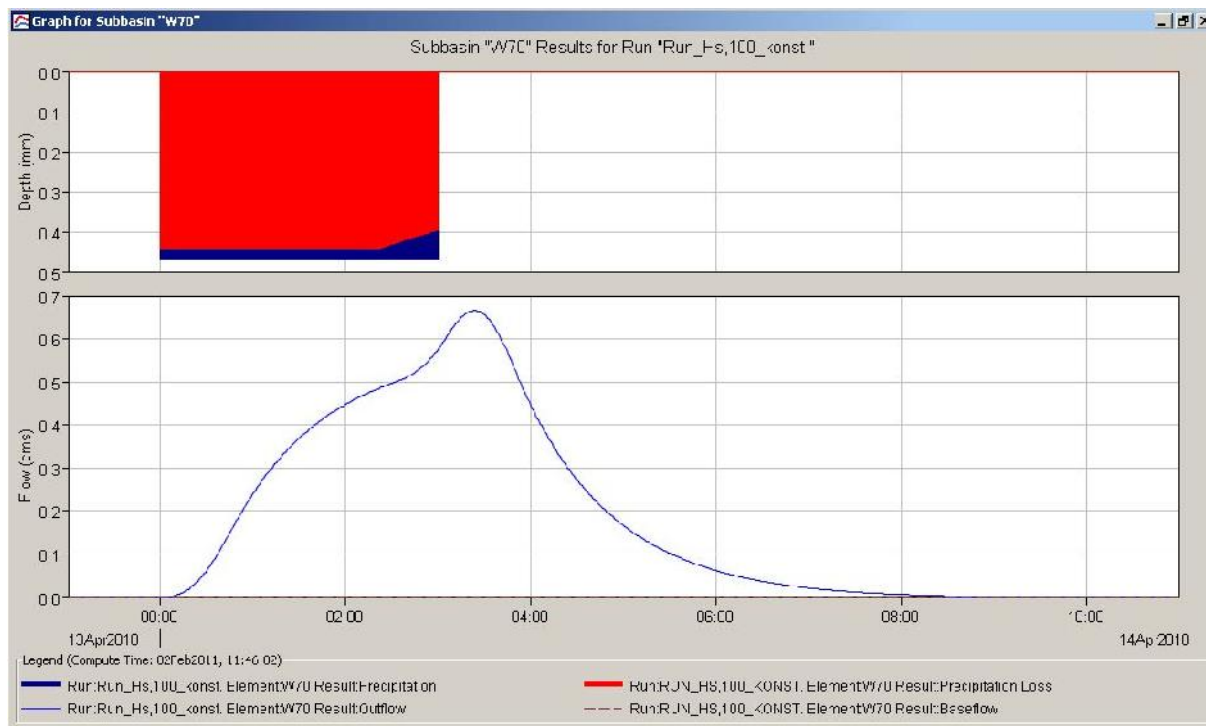
Pro potřebu ověření navrhovaného postupu výpočtu parametrů povrchového odtoku z přívalových srážek s úhrnem $H_{24,100}$ byla v rámci této diplomové práce provedena řada 48 výpočtů s různými vstupními parametry pro hydrologickou transformaci odtoku (12 scénářů), pro hydraulickou transformaci (dvě metody) a pro tvar vstupního hyetogramu (dva typy). Dvanáct scénářů pro výpočet hydrologické transformace v povodí představovalo čtyři druhy povrchu na orné půdě (úhor, úzkořádkové plodiny, širokořádkové plodiny a louka) v kombinaci se třemi stavy nasycení půdního profilu (suchý, průměrný a vlhký).

Pro hydraulickou transformaci odtoku v systému toků se jednalo o dvě metody. Byly použity metody Muskingum-Cunge a Muskingum.[8]

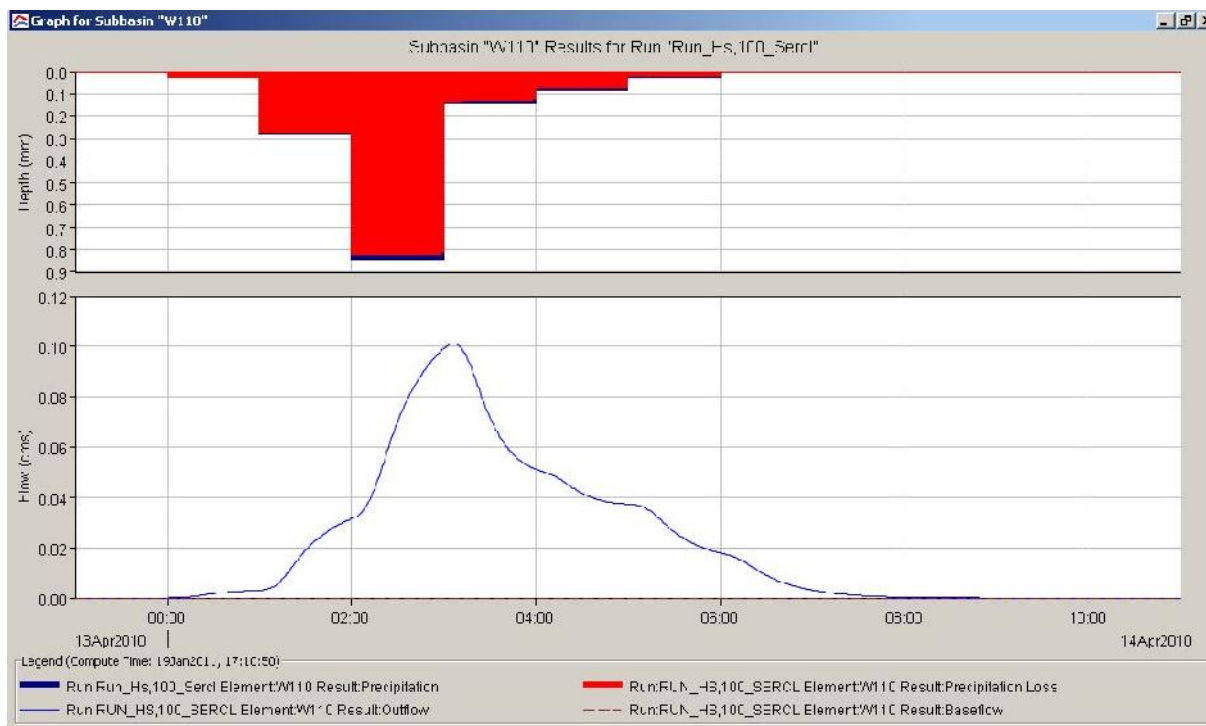
Celé povodí bylo zatěžováno dvěma tvary návrhových hyetogramů, které vycházely z úhrnu $H_{24,100}$. První tvar odpovídal rozdělení úhrnu podle [9]. Druhý tvar představoval konstantní rozložení úhrnu po dobu trvání odpovídající době koncentrace T_c . Na následujících stránkách jsou ukázky obou tvarů hydrogramů v závislosti na časovém rozdělení příčinné srážky. Z obrázků je patrné, že při zvolení totožné srážky se stejným časovým rozložením může být tvar hydrogramu a hlavně kulminační průtok značně odlišný, v závislosti na transformačních vlastnostech jednotlivých povodí.



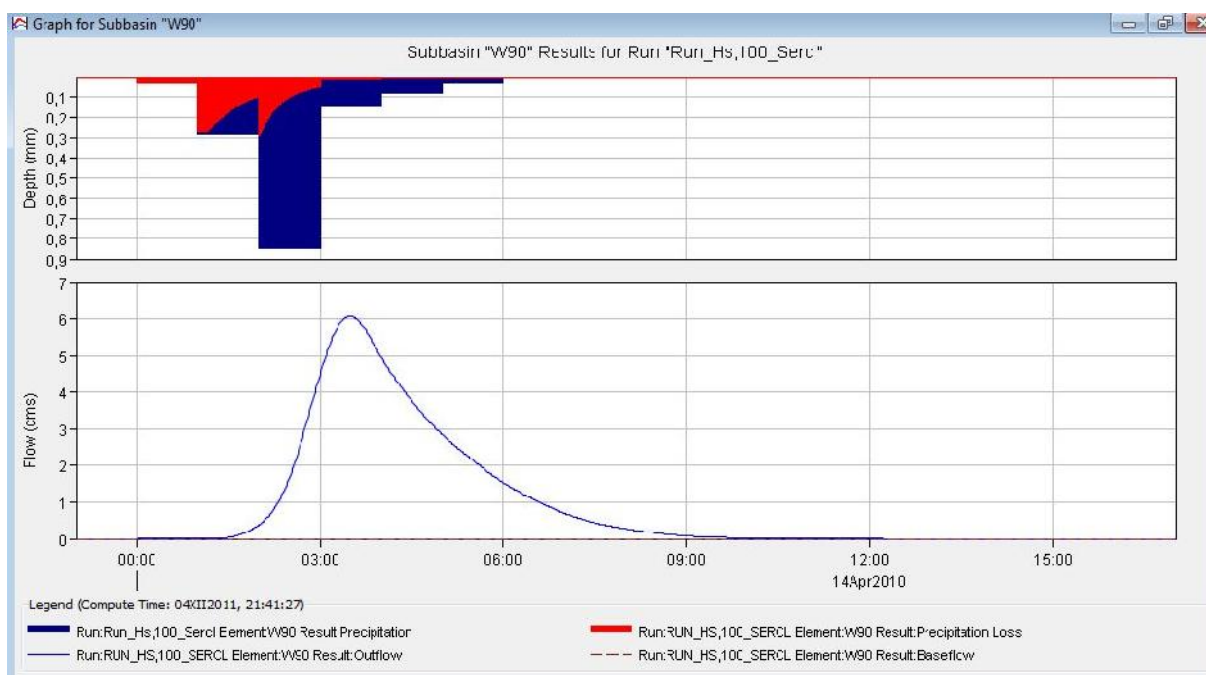
Obr. 19 Tvar hydrogramu způsobený příčinnou srážkou $H_{24,100}$ s konstantním rozdělením na subpovodí W90, s nasyceným půdním profilem a uvažovanou širokořádkovou plodinou na veškeré zemědělské půdě, červená část hydrogramu označuje část srážky zadrženu v povodí, modrá část tvoří vodu odtékající pryč z povodí, tvořící povrchový odtok



Obr. 20 Tvar hydrogramu způsobený příčinnou srážkou $H_{24,100}$ s konstantním rozdělením na subpovodí W70, se suchým půdním profilem a s uvažovaným lučním společenstvem na veškeré orné půdě







Obr. 21 Tvar hydrogramu způsobený příčinnou srážkou $H_{24,100}$ s nekonstantním rozdělením podle [9] na subpovodí W110, se suchým půdním profilem a s uvažovaným lučním společenstvem na veškeré orné půdě







Obr. 22 Tvar hydrogramu způsobený příčinnou srážkou $H_{24,100}$ s nekonstantním rozdělením podle [9] na subpovodí W90, s nasyceným půdním profilem a širokořádkovou plodinou na zemědělské půdě

Výsledky výpočtu jsou přehledně uvedeny v následujících tabulkách. V tabulkách č. 4,5,6 jsou uvedeny hodnoty vypočtených kulminačních průtoků pro různý stav nasycení půdního profilu, použitou hydraulickou transformaci, hydrologickou transformaci v závislosti na způsobu obdělávání orné půdy a tvaru návrhového hyetogramu. Všechny tyto faktory hrály roli při formování povodně a měli tak vliv na tvar hydrogramu, kulminační průtok a objem povodně. V tabulkách č. 7,8,9 jsou uvedeny odchylky kulminačních průtoků v % od hodnoty kulminačního průtoku při průměrných vlhkostních podmínkách pro úzkořádkové plodiny, metodu Muskingum a nerovnoměrné rozdělení srážek. Úzkořádkové plodiny byly voleny z důvodu, že se jedná o běžný způsob hospodaření na zemědělské půdě v experimentálním povodí. Zalučnění je určitým protierozním opatřením a širokořádkové plodiny a úhor jsou naopak nejnepříznivějším stavem v případě zasažení povodí přívalovou srážkou. Volba metody Muskingum a nerovnoměrného rozdělení srážky vycházela ze skutečnosti, že se jednalo o nejnižší hodnotu kulminace pro uvedené vláhové podmínky.





Tab. 4 Porovnání kulminačních průtoků pro suchý půdní profil

Porovnání kulminací [m³/s] - CN I (sucho)				
Povrch	Muskingum		Muskingum-Cunge	
	 Nerovnoměrné rozdělení srážky	 Rovnoměrné rozdělení srážky	 Nerovnoměrné rozdělení srážky	 Rovnoměrné rozdělení srážky
louka	1.36	1.45	1.60	1.71
úzkořádkové plodiny	3.41	4.35	3.97	5.19
šírokořádkové plodiny	4.83	5.93	5.69	6.98
úhor	5.91	7.06	7.01	8.25





Tab. 5 Porovnání kulminačních průtoků pro půdní profil s průměrnou vlhkostí

Porovnání kulminací [m³/s] - CN II (průměrná vlhkost)				
Povrch	Muskingum		Muskingum-Cunge	
	 Nerovnoměrné rozdělení srážky	 Rovnoměrné rozdělení srážky	 Nerovnoměrné rozdělení srážky	 Rovnoměrné rozdělení srážky
louka	6.48	7.71	7.90	9.08
úzkořádkové plodiny	11.27	12.26	13.75	14.05
šírokořádkové plodiny	12.89	13.69	15.70	15.56
úhor	14.47	15.02	17.57	16.94





Tab. 6 Porovnání kulminačních průtoků pro nasycený půdní profil

Porovnání kulminací [m³/s] - CN III (nasycený půdní profil)				
Povrch	Muskingum		Muskingum-Cunge	
	 Nerovnoměrné rozdělení srážky	 Rovnoměrné rozdělení srážky	 Nerovnoměrné rozdělení srážky	 Rovnoměrné rozdělení srážky
louka	15.88	16.11	19.42	18.10
úžkořádkové plodiny	20.22	19.53	24.56	21.55
širokořádkové plodiny	21.52	20.50	26.08	22.50
úhor	22.65	21.32	27.37	23.27





Tab. 7 Procentuální srovnání kulminačních průtoků s ohledem na nasycení půdního profilu, zvolenou metodu hydraulické transformace, půdní pokryv a časové rozdělení příčinné srážky

Porovnání kulminací [%] - CN I (sucho)				
Povrch	Muskingum		Muskingum-Cunge	
	 Nerovnoměrné rozdělení srážky	 Rovnoměrné rozdělení srážky	 Nerovnoměrné rozdělení srážky	 Rovnoměrné rozdělení srážky
louka	12.0	12.9	14.2	15.1
úžkořádkové plodiny	30.2	38.6	35.2	46.0
širokořádkové plodiny	42.8	52.6	50.5	61.9
úhor	52.5	62.6	62.1	73.2

Tab. 8 Procentuální srovnání kulminačních průtoků s ohledem na nasycení půdního profilu, zvolenou metodu hydraulické transformace, půdní pokryv a časové rozdělení příčinné srážky





Porovnání kulminací [%] - CN II (průměrná vlhkost)				
Povrch	Muskingum		Muskingum-Cunge	
	 Nerovnoměrné rozdělení srážky	 Rovnoměrné rozdělení srážky	 Nerovnoměrné rozdělení srážky	 Rovnoměrné rozdělení srážky
louka	57.5	68.3	70.0	80.6
úžkořádkové plodiny	100.0	108.8	122.0	124.6
širokořádkové plodiny	114.4	121.4	139.2	138.0
úhor	128.3	133.2	155.8	150.3

Tab. 9 Procentuální srovnání kulminačních průtoků s ohledem na nasycení půdního profilu, zvolenou metodu hydraulické transformace, půdní pokryv a časové rozdělení příčné srážky





Porovnání kulminací [%] - CN III (nasycený půdní profil)				
Povrch	Muskingum		Muskingum-Cunge	
	 Nerovnoměrné rozdělení srážky	 Rovnoměrné rozdělení srážky	 Nerovnoměrné rozdělení srážky	 Rovnoměrné rozdělení srážky
louka	140.9	142.9	172.2	160.5
úžkořádkové plodiny	179.4	173.2	217.8	191.2
širokořádkové plodiny	190.9	181.8	231.3	199.6
úhor	200.9	189.1	242.8	206.4

V tabulkách č. 10, 11, 12 jsou uvedeny hodnoty vypočtených objemů. V tabulkách č. 13, 14, 15 jsou uvedeny odchylky objemů odtoku v % od hodnoty objemu odtoku při průměrných vlhkostních podmínkách pro úžkořádkové plodiny, metodu Muskingum a nerovnoměrné rozdělení srážek.





Tab. 10 Porovnání objemu odtoku v závislosti na mnoha srážko-odtokových faktorech

Porovnání objemu odtoku [1000 m³] - CN I (sucho)				
Povrch	Muskingum		Muskingum-Cunge	
	 Nerovnoměrné rozdělení srážky	 Rovnoměrné rozdělení srážky	 Nerovnoměrné rozdělení srážky	 Rovnoměrné rozdělení srážky
louka	16.77	16.79	16.78	16.79
úžkořádkové plodiny	40.17	40.21	40.19	40.21
širokořádkové plodiny	54.39	54.44	54.41	54.44
úhor	65.20	65.25	65.22	65.25





Tab. 11 Porovnání objemu odtoku v závislosti na mnoha srážko-odtokových faktorech

Porovnání objemu odtoku [1000 m³] - CN II (průměrná vlhkost)				
Povrch	Muskingum		Muskingum-Cunge	
	 Nerovnoměrné rozdělení srážky	 Rovnoměrné rozdělení srážky	 Nerovnoměrné rozdělení srážky	 Rovnoměrné rozdělení srážky
louka	69.04	69.09	69.06	69.09
úžkořádkové plodiny	115.29	115.36	115.32	115.36
širokořádkové plodiny	130.74	130.81	130.77	130.81
úhor	145.75	145.82	145.78	145.82





Tab. 12 Porovnání objemu odtoku v závislosti na mnoha srážko-odtokových faktorech

Porovnání objemu odtoku [1000 m3] - CN III (nasycený půdní profil)				
Povrch	Muskingum		Muskingum-Cunge	
	 Nerovnoměrné rozdělení srážky	 Rovnoměrné rozdělení srážky	 Nerovnoměrné rozdělení srážky	 Rovnoměrné rozdělení srážky
louka	157.18	157.25	157.21	157.25
úžkořádkové plodiny	198.85	198.94	198.89	198.94
šírokořádkové plodiny	211.48	211.56	211.51	211.56
úhor	222.56	222.65	222.59	222.64





Tab. 13 Procentuální srovnání objemů odtoku s ohledem na nasycení půdního profilu, zvolenou metodu hydraulické transformace, půdní pokryv a časové rozdělení příčinné srážky

Porovnání objemu odtoku [%] - CN I (sucho)				
Povrch	Muskingum		Muskingum-Cunge	
	 Nerovnoměrné rozdělení srážky	 Rovnoměrné rozdělení srážky	 Nerovnoměrné rozdělení srážky	 Rovnoměrné rozdělení srážky
louka	14.5	14.6	14.6	14.6
úžkořádkové plodiny	34.8	34.9	34.9	34.9
šírokořádkové plodiny	47.2	47.2	47.2	47.2
úhor	56.5	56.6	56.6	56.6

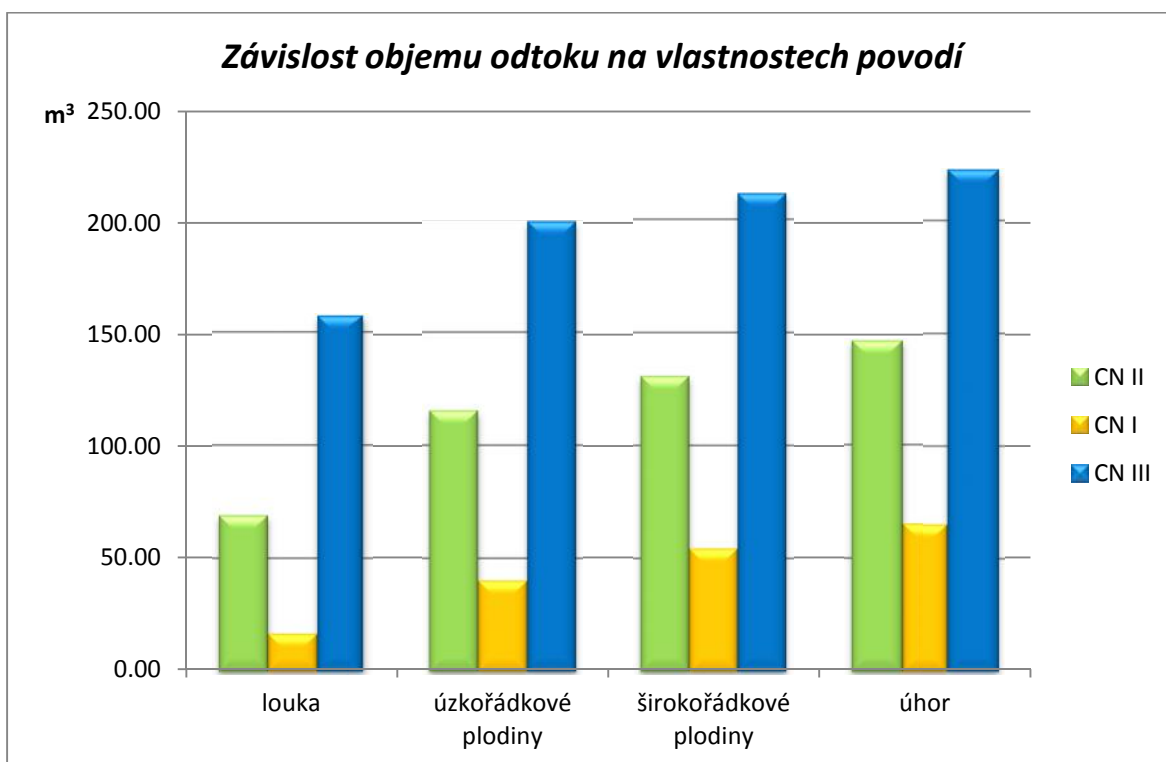
Tab. 14 Procentuální srovnání objemů odtoku s ohledem na nasycení půdního profilu, zvolenou metodu hydraulické transformace, půdní pokryv a časové rozdělení příčinné srážky

Porovnání objemu odtoku [%] - CN II (průměrná vlhkost)				
Povrch	Muskingum		Muskingum-Cunge	
	 Nerovnoměrné rozdělení srážky	 Rovnoměrné rozdělení srážky	 Nerovnoměrné rozdělení srážky	 Rovnoměrné rozdělení srážky
louka	59.9	59.9	59.9	59.9
úžkořádkové plodiny	100.0	100.1	100.0	100.1
šírokořádkové plodiny	113.4	113.5	113.4	113.5
úhor	126.4	126.5	126.4	126.5

Tab. 15 Procentuální srovnání objemů odtoku s ohledem na nasycení půdního profilu, zvolenou metodu hydraulické transformace, půdní pokryv a časové rozdělení příčné srážky

Porovnání objemu odtoku [%] - CN III (nasycený půdní profil)				
<i>Povrch</i>	<i>Muskingum</i>		<i>Muskingum-Cunge</i>	
	 <i>Nerovnoměrné rozdělení srážky</i>	 <i>Rovnoměrné rozdělení srážky</i>	 <i>Nerovnoměrné rozdělení srážky</i>	 <i>Rovnoměrné rozdělení srážky</i>
<i>louka</i>	136.3	136.4	136.4	136.4
<i>úzkoračkové plodiny</i>	172.5	172.6	172.5	172.6
<i>širokoračkové plodiny</i>	183.4	183.5	183.5	183.5
<i>úhor</i>	193.0	193.1	193.1	193.1

Z následujících výpočtů a vložených tabulek je možno vypořadovat několik zajímavých faktů. Prvním z nich je ten, že návrhový tvar hyetogramu ani zvolená výpočetní metoda hydraulické transformace nemá téměř žádný vliv na **velikost objemu odtoku**. Jedinými faktory ovlivňující tento výstup je předchozí nasycení půdního profilu a volba plodiny pěstované na orné půdě, v důsledku to znamená měnící se CN číslo v závislosti na výše uvedených faktorech. Objem odtoku z experimentálního povodí Němčického potoka se v těchto případech pohybuje mezi 16 770 m³ pro suchý půdní profil s lučním společenstvem na orné půdě a 222 650 m³ pro nasycený půdní profil na zorané půdě bez jakékoliv vegetace. Pokud se budeme řídit předpokladem z předchozího odstavce a jako návrhovou situaci budeme brát úzkoračkovou plodinu na průměrně vlhké orné půdě, nerovnoměrné rozložení srážky a výpočtovou metodu Muskingum bude odtok roven 115 290 m³, což v našem případě představuje hodnotu 100%. Potom se objem odtoku pohybuje v rozmezí -85,5% a + 93,1%. Celkový rozptyl objemu odtoku je 205 880 m³ v závislosti nasycení půdního profilu předchozí srážkou a volbě pěstované zemědělské plodiny. Z pohledu navrhování malých vodních nádrží je to obrovský rozdíl a při zvolení nevhodné metody, by mohlo dojít k poddimenzování celé stavby, které by v tom nejhorším případě mohlo vést až k přelití koruny hráze a následnému vzniku trhlin a protržení hráze. Na následující obrázku je pro lepší představu ukázán graf s hodnotami jednotlivých objemů odtoku v závislosti na předchozím nasycení půdního profilu a volbě zemědělské plodiny pěstované na orné půdě. Jelikož má na hodnotu objemu odtoku zanedbatelný vliv volba tvaru návrhového hyetogramu a metoda hydraulické transformace, byla pro hodnoty v grafu zvolena metoda Muskingum a nerovnoměrné rozložení příčné srážky.



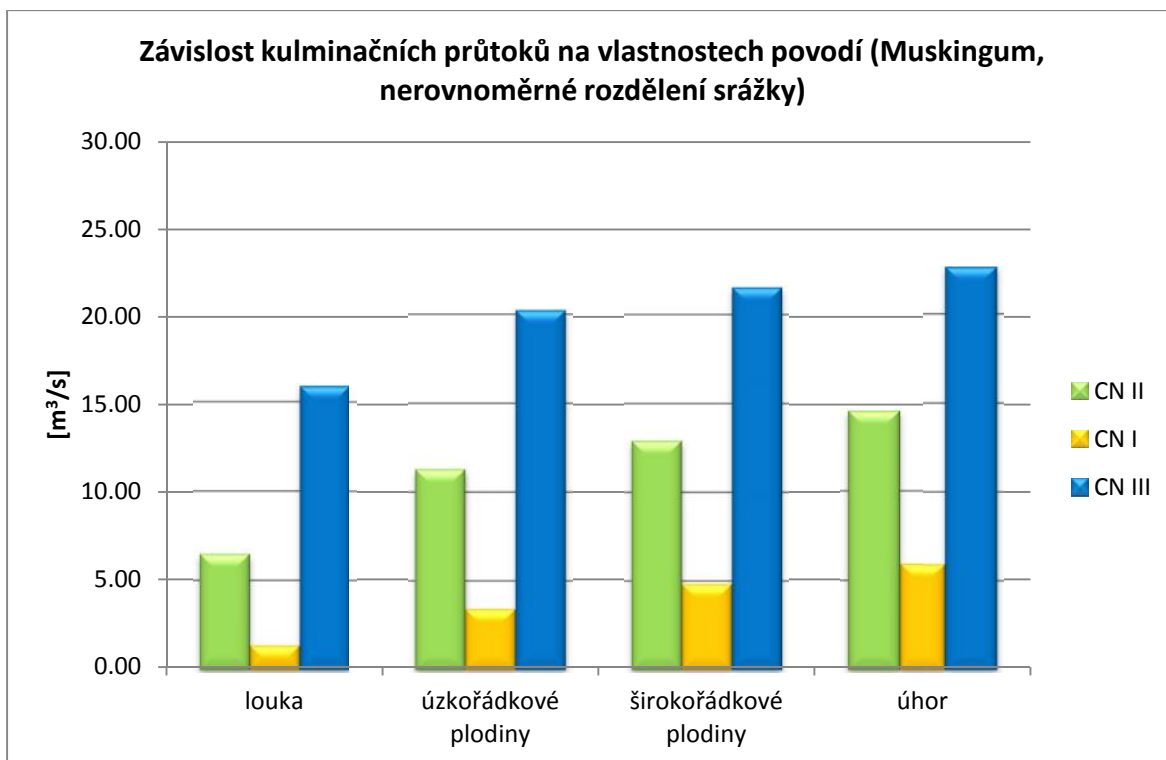
Graf 1 Graf znázorňující závislost objemu odtoku na transformačních vlastnostech povodí

V tomto odstavci bude věnována pozornost vlivu hydraulické a hydrologické transformace, tvaru návrhového hyetogramu, pěstebnímu postupu a stavu nasycení půdního profilu na **velikost kulminačního průtoku** v závěrovém profilu experimentálního povodí. Na rozdíl od předchozího případu, kdy byly vyhodnoceny objemy odtoků, má nyní vliv na velikost kulminačního průtoku také zvolená metoda hydraulické transformace a tvar návrhového hyetogramu. Jako výchozí situace byla zvolena ta, při níž na orné půdě bylo uvažováno s úzkořádkovou plodinou, průměrně vlhkým půdním profilem, výpočtovou metodou Muskingum a nerovnoměrným rozložením srážky $H_{24, 100}$ podle [9]. Za této situace byla hodnota kulminačního průtoku $11,27 \text{ m}^3/\text{s}$ což odpovídalo relativní hodnotě 100%. V závislosti na tvaru návrhového hyetogramu (volbou rovnoměrného nebo nerovnoměrného rozložení srážky) se rozdíl v kulminačních průtocích pohybovali v rozmezí 0,9% až 36,4% v absolutních hodnotách se jednalo o rozdíl 0,11 až $4,11 \text{ m}^3/\text{s}$. V dalším kroku se zkoumalo, jaký vliv na velikost kulminačního průtoku bude mít volba metody pro výpočet hydraulické transformace (Muskingum, Muskingum-Cunge). Zde se ukázalo, že velký vliv má v tomto případě také časové rozložení návrhové srážky. Zatímco při rovnoměrném rozdělení se odchylky mezi oběma metodami pohybovaly v rozmezí 2,3% až 18% ($0,26 - 2,11 \text{ m}^3/\text{s}$), při nerovnoměrném rozdělení se odchylky blížili až ke 42% ($4,72 \text{ m}^3/\text{s}$). Dalším vlivem

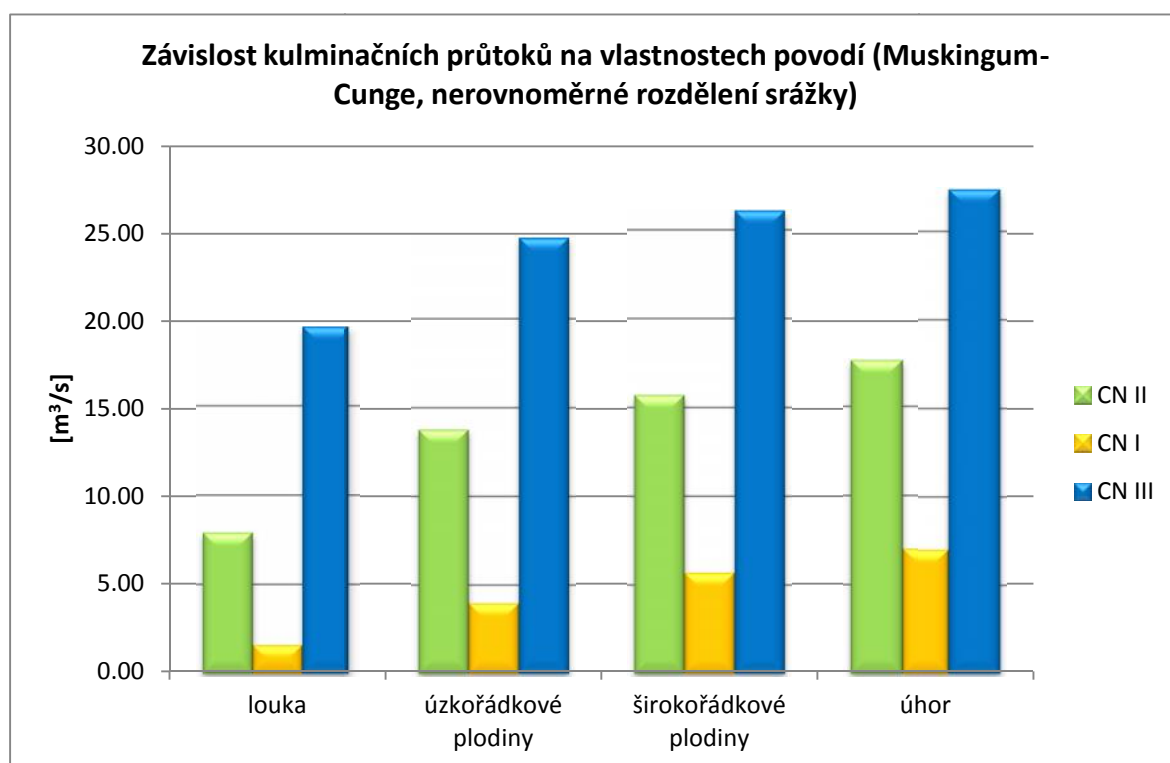
ovlivňující odtok vody z povodí zasaženého srážkovou událostí je druh plodiny pěstované na orné půdě. V našem případě se porovnávali čtyři varianty (louka, úzkořádková plodina, širokořádková plodina a úhor). Jak je obecně známo, nejlepší vliv při transformaci srážky má louka naopak problémovými jsou širokořádkové rostliny. To platí jak pro erozi, tak i pro velikost kulminačního průtoku. V našem případě se toto potvrdilo a v některých případech byl kulminační průtok z povodí s loukami až o 42,5 % nižší než kdyby, byla na zemědělské půdě pěstována úzkořádková plodina. Naopak v povodí s obnaženou ornou půdou bez vegetačního pokryvu byl průtok až o 33,8 % vyšší než v případě úzkořádkové plodiny. Největší rozdíl kulminačních průtoků činil 70,8%, což představuje v absolutních číslech rozdíl téměř 8 m³/s. Posledním parametrem ovlivňujícím kulminační průtok je nasycenost půdního profilu předchozí srážkou. V našem případě se vycházelo z průměrné vlhkosti a pro porovnání byly sledovány dva extrémy půdní profil suchý a nasycený. Odchyly kulminačních průtoků v závislosti na předchozím nasycení se pohybovali od -93,7% v případě sucha do +102,2% v případě nasyceného půdního profilu. Největší rozdíl v tomto případě tvořil 182,7 %, to znamená 20,39 m³/s.

Z předchozích zjištění vyplývá, že jednoznačně největší vliv na velikost kulminačního průtoku má nasycení půdního profilu předchozí srážkou (rozdíl může činit až 20,39 m³/s), druhým výrazným činitelem ovlivňujícím transformační vlastnosti povodí je zvolený osevný postup na zemědělské půdě (až 8 m³/s). Tyto dva hlavní faktory při vytváření srážko-odtokového modelu potom doplňuje volba metody hydraulické transformace a způsob rozdělení příčinné srážky. Obě tyto metody ovlivňují velikost kulminačního průtoku v jednotkách m³/s. Nutno podotknout, že tyto hodnoty se váží k experimentálnímu povodí o rozloze cca 4 km².

Při kombinaci všech uvažovaných faktorů se mohou odchylky kulminačních průtoků od zvolené výchozí hodnoty pohybovat v rozmezí -82% až +142,8% (-9,24 m³/s - +16,09 m³/s). V extrémním případě se tedy kulminační průtok může pohybovat v rozmezí 1,36 m³/s (suchý půdní profil, louka, metoda Muskingum, nerovnoměrné rozložení srážky) až 27,37 m³/s (nasycený půdní profil, úhor, metoda Muskingum-Cunge, nerovnoměrné rozložení srážky). To jsou však 2 extrémní případy transformace příčinné srážky H_{24, 100}. Na následujících grafech jsou přehledně zobrazeny kulminační průtoky v závislosti na různých faktorech ovlivňujících transformaci.



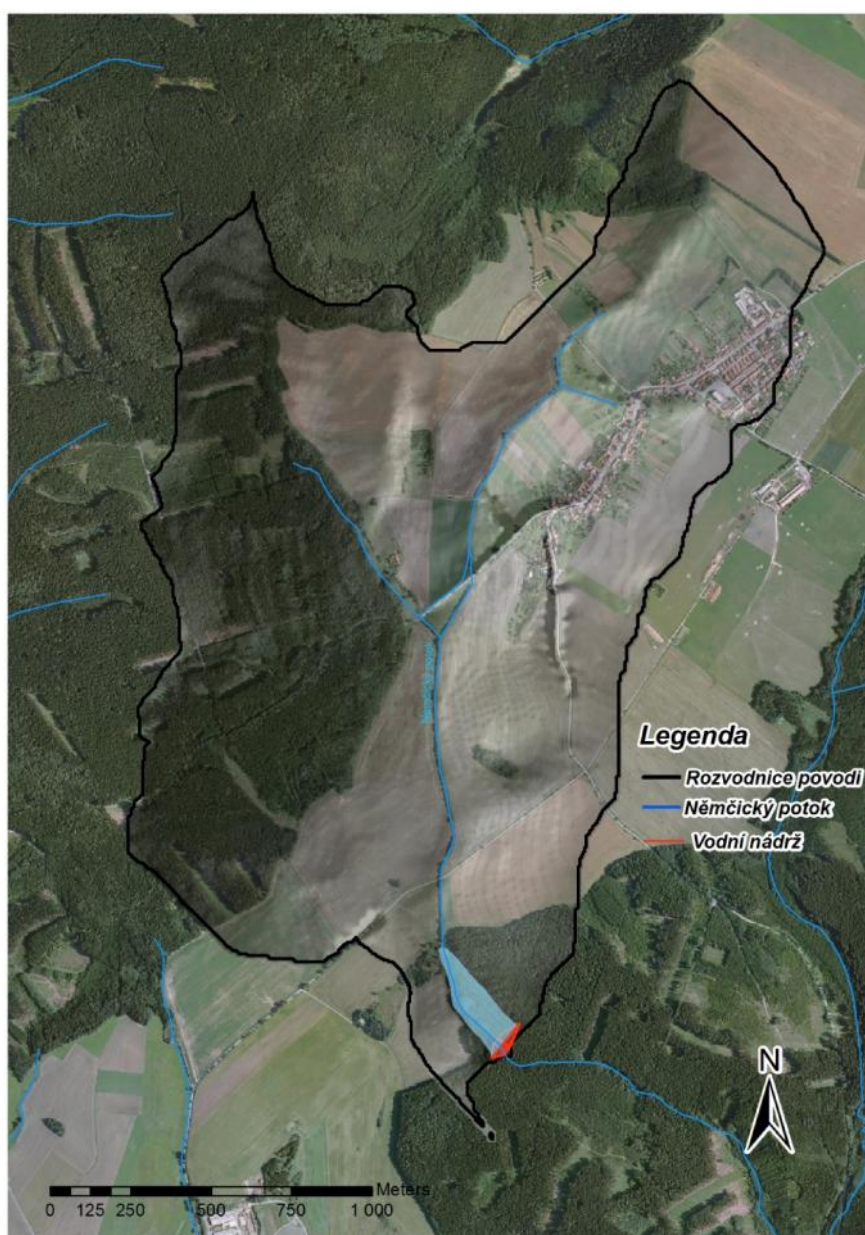
Graf 2 Závislost kulminačních průtoků na vlastnostech povodí (metoda Muskingum, nerovnoměrné rozložení příčinné srážky)



Graf 3 Závislost kulminačních průtoků na vlastnostech povodí (metoda Muskingum-Cunge, nerovnoměrné rozložení příčinné srážky)

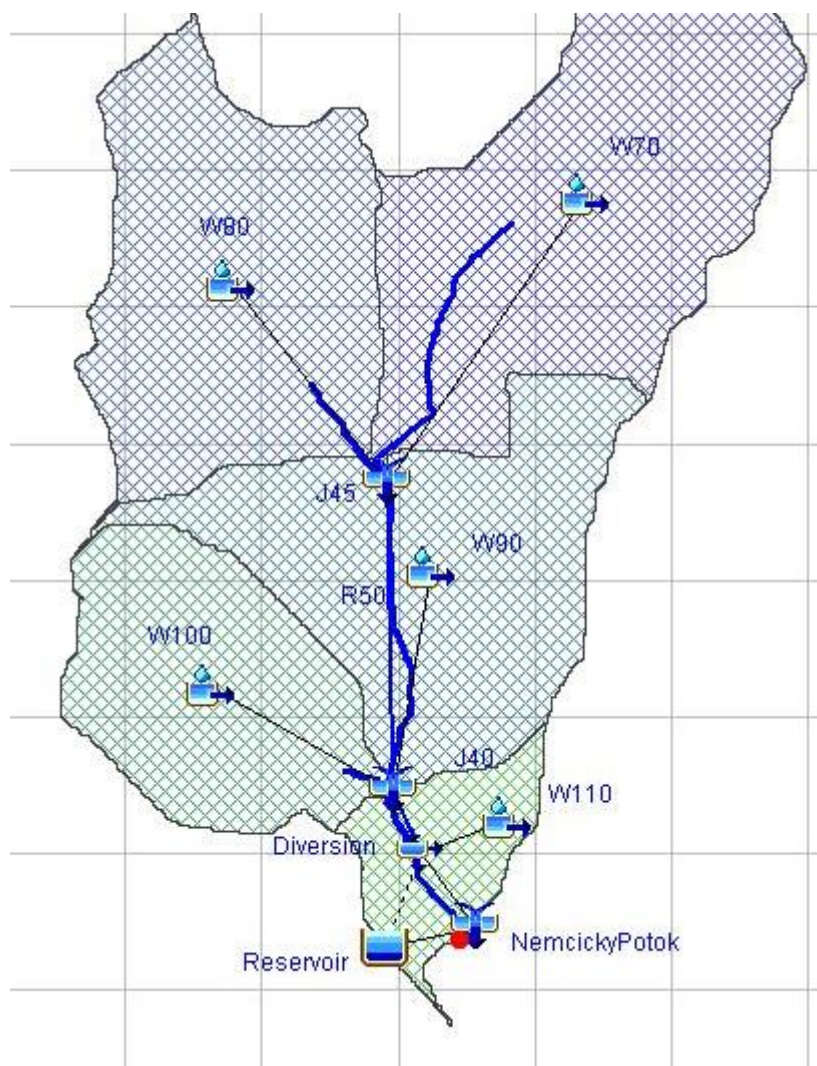
UMÍSTĚNÍ NÁDRŽE V POZOROVANÉM POVODÍ

Poté co byla provedena kalibrace modelu, byly prozkoumány všechny uvažované vlivy ovlivňující transformační vlastnosti povodí a zjištěn jejich rozsah, ve kterém jsou schopny ovlivnit velikost jak kulminačního průtoku, tak objemu odtoku, bylo určeno umístění fiktivní nádrže, u které bude zkoumán její vliv na transformaci povodňové vlny v závislosti na nastavení jejích základních parametrů. Jelikož všechny výstupy srážko-odtokového modelu byly počítány pro závěrový profil experimentálního území, nabízelo se tudíž toto místo jako příhodné pro umístění malé vodní nádrže.



Obr. 23 Umístění nádrže v rámci experimentálního povodí

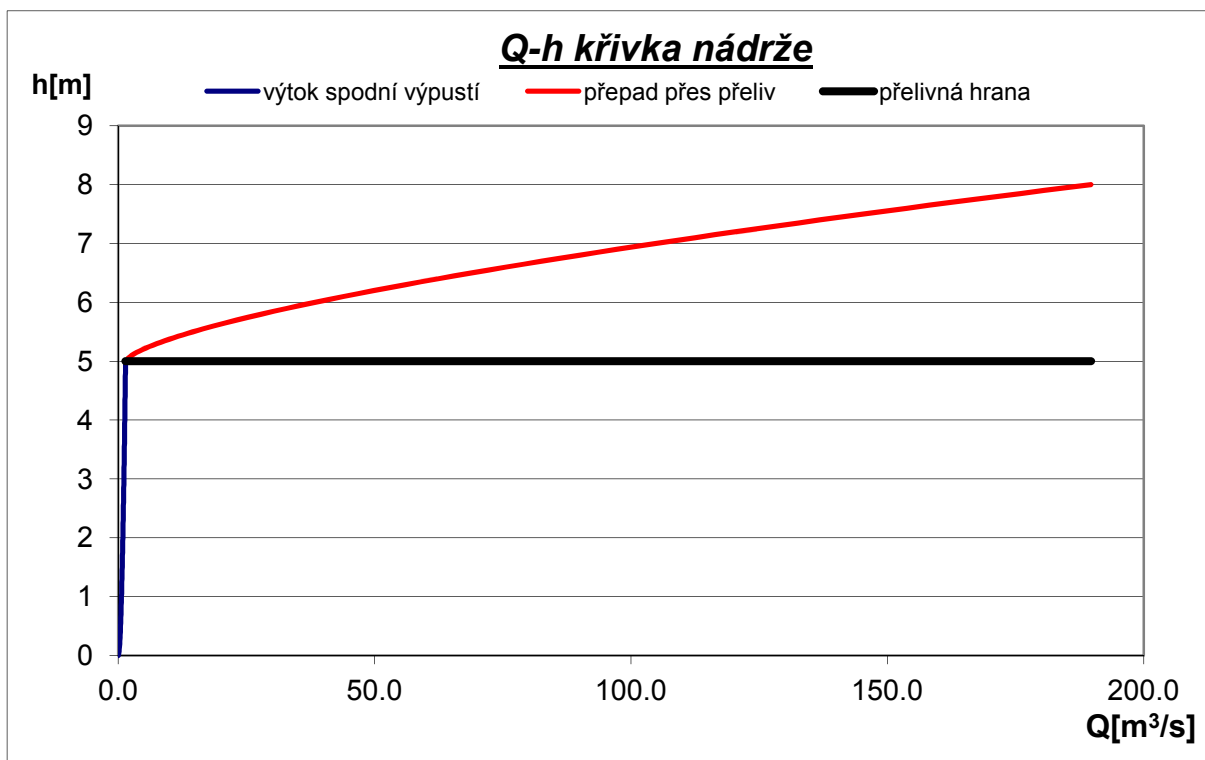
Jelikož výpočet objemu zadrženého v nádrži při povodňové situaci a schopnost retence kulminačního průtoku byla modelována v programu HEC-HMS, bylo za potřebí upravit schematizaci povodí a přidat sem další element z nabídky Tvorba nástrojů (Creation tools) a to prvek reprezentující zkoumanou nádrž (Reservoir). Následující obrázek ukazuje schematizované povodí s přidanou vodní nádrží.



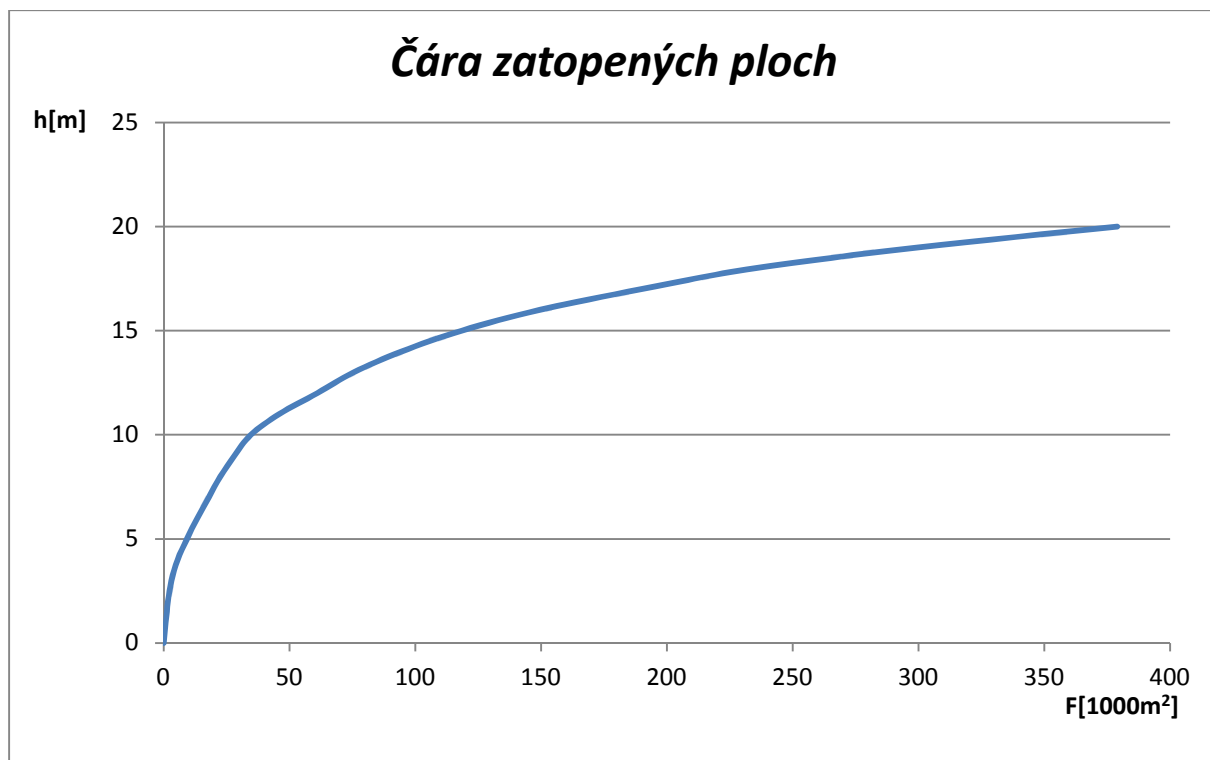
Obr. 24 Schematizace povodí se zapojením malé vodní nádrže

V dalším kroku po vložení nádrže do schematizovaného povodí bylo zapotřebí se s nově vytvořeným nástrojem dobře seznámit. Disponuje totiž velkým množstvím možností jeho nastavení a pro správnou funkci je zapotřebí všechny podkladní data vytvořit a vložit správným způsobem. Jako nástroj pro výpočet výtoku z nádrže byla zvolena metoda výtokové křivky (Outflow curve). Aby tato funkce mohla být spuštěna, muselo být vytvořeno několik vstupních dat:

- Čára zatopených ploch nebo objemů (možnost výběru jedné z těchto funkcí, v našem případě to byla čára zatopených ploch, pro kterou si potom automaticky program HEC-HMS vypočítal čáru zatopených objemů), k sestavení této funkce bylo použito programu GIS, kde se pro každou polohu hladiny vody v nádrži vytvořil polygon reprezentující zatopenou plochu a pomocí atributové tabulky a funkce Calculate Geometry jednoduše spočetl obsah jednotlivých ploch. Tabulka potom byla převedena do tabulkového procesoru. Zde byl vytvořen graf závislosti hloubky vody v nádrži na ploše hladiny.
- Q-h křivka nádrže (závislost výtoku z nádrže na výšce hladiny), byla vytvořena v tabulkovém procesoru s pomocí vzorců (15), (16), (17), (18), (19). Ukázka jedné z vytvořených křivek je uvedena níže. Z Excelu se hodnoty snadno zkopírováním převedly do programu HEC-HMS.
- Rozdělovací funkce (nutné vytvořit pro správné zapojení nádrže v povodí, rozděluje, kolik vody poteče do nádrže, v našem případě jen doplňková funkce, plně využitá by mohla být v případě, že by se u nádrže nacházel například obtokový kanál nebo rybí přechod)



Graf 4 Ukázka Q-h křivky nádrže v případě spodní výpusti DN500 a přelivné hrany vysoké 5 metrů a délkou přelivné hrany 20 m



Graf 5 Čára zatopených ploch

NÁVRH PARAMETRŮ RETENČNÍ NÁDRŽE

Při hledání optimálních parametrů nádrže se vycházelo z několika scénářů. Po předešlém vyhodnocení vlastností povodí na transformaci přívalové srážky a získání kulminačních průtoků, byla jako velikost návrhového průtoku uvažována hodnota 13,75 m³/s, reprezentující hodnotu 100-letého kulminačního průtoku. Dále byla vytvořena množina Q-h křivek lišících se dimenzí spodního výtoku otvoru a polohou přelivné hrany bezpečnostního přelivu. Délka přelivné hrany byla spočítána pomocí vzorce vycházejícího ze vztahu (17):

$$b_0 = \frac{m * \sqrt{2g} * h^{\frac{3}{2}}}{Q_n} \quad (22)$$

Q_nnávrhový průtok [m³/s]

V následující tabulce je ukázka výpočtu parametrů bezpečnostního přelivu. Při tomto návrhu není uvažováno s výtokem spodní výpustí a délka přelivné hrany je dimenzována, tak aby byla, pomocí navržené výšky přepadového paprsku, schopna převést návrhový průtok.

Tab. 16 Výpočet délky přelivné hrany s ohledem na výšku přepadového paprsku

h [m]	K_v	b_0 [m]	Q [m ³ /s]
0.1	0.100	21.980	1.268
0.2	0.099	21.960	3.585
0.3	0.099	21.941	6.579
0.4	0.098	21.921	10.121
0.5	0.098	21.902	14.132
0.6	0.097	21.883	18.560
0.7	0.097	21.864	23.368
0.8	0.096	21.846	28.526
0.9	0.096	21.827	34.010
1	0.096	21.809	39.799

Z tabulky je zjevné, že délka přepadové hrany v tomto případě činila 22 m. Poté co byly navrženy parametry bezpečnostního objektu, mohlo se přistoupit k samotnému návrhu nádrže pomocí srážko-odtokového modelu v programu HEC-HMS. Hledala se optimální varianta mezi výškou nádrže a její retenční schopností. K tomuto účelu sloužil HEC-HMS a jeho číselné a grafické výstupy. Jednotlivé výstupy byly potom převedeny do tabulkového procesoru, kde byly přehledně uspořádány, aby z nich mohla být vybrána nejlepší varianta. Hlavní roli při retenci průtoku hrála dimenze spodní výpusti a poloha přelivné hrany. V prvním kroku se zjišťovalo do jaké výšky by vystoupila hladina vody v nádrži, v případě kdy by měla pohltit celý objem povodně (tab.17).

Tab. 17 Hodnoty, za kterých by nádrž byla schopna pojmout celý objem odtoku z experimentálního povodí

situace:	CN II_uzko		
objekt:	poloha přelivu	10	m
	spodní propust DN:	min	
kulminační přítok		13.752	m ³ /s
kulminační odtok		0	m ³ /s
zadržený objem		115.328	m ³
poloha vody v nádrži		9.878	m

V dalším kroku se uvažovalo s různými variantami polohy přelivné hrany a dimenze spodní výpusti. Ve výpočtu bylo uvažováno s výpustmi DN300, DN500 a DN1000 a s měnicí se polohou přepadové hrany. Všechny varianty byly uspořádány do tabulek, ze kterých byla poté vybrána optimální varianta, jež zohledňovala retenční schopnost a polohu přelivné hrany. Z té vycházela celková poloha koruny hráze a tudíž i potřeba materiálu pro násyp tělesa hráze.

Tab. 18 Uspořádání vlastností nádrže (spodní výpust DN1000), kulminační odtok, zadržený objem a poloha vody v nádrži v závislosti na poloze přelivné hrany

DN 1000

situace:	CN_II_uzko		
objekt:	poloha přelivu	5	m
	spodní propust DN:	1000	
kulminační přítok		13.752	m ³ /s
kulminační odtok		12.359	m ³ /s
zadržený objem		18.61	1000m ³
poloha vody v nádrži		5.298	m

situace:	CN_II_uzko		
objekt:	poloha přelivu	6.5	m
	spodní propust DN:	1000	
kulminační přítok		13.752	m ³ /s
kulminační odtok		6.722	m ³ /s
zadržený objem		34.477	1000m ³
poloha vody v nádrži		6.516	m

situace:	CN_II_uzko		
objekt:	poloha přelivu	8	m
	spodní propust DN:	1000	
kulminační přítok		13.752	m ³ /s
kulminační odtok		6.532	m ³ /s
zadržený objem		34.58	1000m ³
poloha vody v nádrži		6.522	m

Tab. 19 Uspořádání vlastností nádrže (spodní výpust DN300)

DN 300

<i>situace:</i>	CN II_uzko		
objekt:	poloha přelivu	5	m
	spodní propust DN:	300	
kulminační přítok		13.752	m ³ /s
kulminační odtok		13.482	m ³ /s
zadržený objem		20.404	1000m ³
poloha vody v nádrži		5.465	m

<i>situace:</i>	CN II_uzko		
objekt:	poloha přelivu	6.5	m
	spodní propust DN:	300	
kulminační přítok		13.752	m ³ /s
kulminační odtok		10.838	m ³ /s
zadržený objem		40.797	1000m ³
poloha vody v nádrži		6.898	m

<i>situace:</i>	CN II_uzko		
objekt:	poloha přelivu	8	m
	spodní propust DN:	300	
kulminační přítok		13.752	m ³ /s
kulminační odtok		6.583	m ³ /s
zadržený objem		69.201	1000m ³
poloha vody v nádrži		8.275	m

<i>situace:</i>	CN II_uzko		
objekt:	poloha přelivu	9	m
	spodní propust DN:	300	
kulminační přítok		13.752	m ³ /s
kulminační odtok		2.96	m ³ /s
zadržený objem		92.159	1000m ³
poloha vody v nádrži		9.141	m

<i>situace:</i>	CN II_uzko		
objekt:	poloha přelivu	10	m
	spodní propust DN:	300	
kulminační přítok		13.752	m ³ /s
kulminační odtok		0.707	m ³ /s
zadržený objem		100.669	1000m ³
poloha vody v nádrži		9.425	m

Tab. 20 Uspořádání vlastností nádrže (spodní výpust DN500)

DN 500

situace:	CN II_uzko		
objekt:	poloha přelivu	5	m
	spodní propust DN:	500	
kulminační přítok		13.752	m ³ /s
kulminační odtok		13.371	m ³ /s
zadržený objem		20.14	1000m ³
poloha vody v nádrži		5.44	m

situace:	CN II_uzko		
objekt:	poloha přelivu	6.5	m
	spodní propust DN:	500	
kulminační přítok		13.752	m ³ /s
kulminační odtok		10.352	m ³ /s
zadržený objem		40.068	1000m ³
poloha vody v nádrži		6.856	m

situace:	CN II_uzko		
objekt:	poloha přelivu	8	m
	spodní propust DN:	500	
kulminační přítok		13.752	m ³ /s
kulminační odtok		5.707	m ³ /s
zadržený objem		67.608	1000m ³
poloha vody v nádrži		8.208	m

situace:	CN II_uzko		
objekt:	poloha přelivu	9	m
	spodní propust DN:	500	
kulminační přítok		13.752	m ³ /s
kulminační odtok		1.897	m ³ /s
zadržený objem		82.528	1000m ³
poloha vody v nádrži		8.797	m

situace:	CN II_uzko		
objekt:	poloha přelivu	10	m
	spodní propust DN:	500	
kulminační přítok		13.752	m ³ /s
kulminační odtok		1.897	m ³ /s
zadržený objem		82.528	1000m ³
poloha vody v nádrži		8.797	m

POROVNÁNÍ TRANSFORMAČNÍ SCHOPNOSTI

Z předchozích výstupů byla vybrána optimální varianta, jež je reprezentována nádrží se spodní výpustí DN1000 a polohou přelivné hrany 6,5 m. Bylo tak učiněno, proto, že nádrže se spodními výpustmi DN300 a DN500 dosahují podobných transformačních účinků (z přítoku 13,76 m³/s na výtok cca 6,5 m³/s) až při výšce přepadu 8 metrů. To je o 1,5 m výše než navrhovaná varianta. Takové zvýšení přepadové hrany a tudíž i koruny hráze by se nezanedbatelným způsobem promítlo na ceně celé stavby. Výsledným návrhem by tedy byla nádrž s dimenzí spodní výpusti DN1000 a polohou přelivné hrany 6,5m. U návrhu bezpečnostního přelivu bylo počítáno s přepadovým paprskem 0,5 m, bezpečnostní převýšení koruny hráze se ve většině případů pohybuje kolem hodnoty 0,5m. Celková výška tělesa hráze by tedy byla 7,5 m.

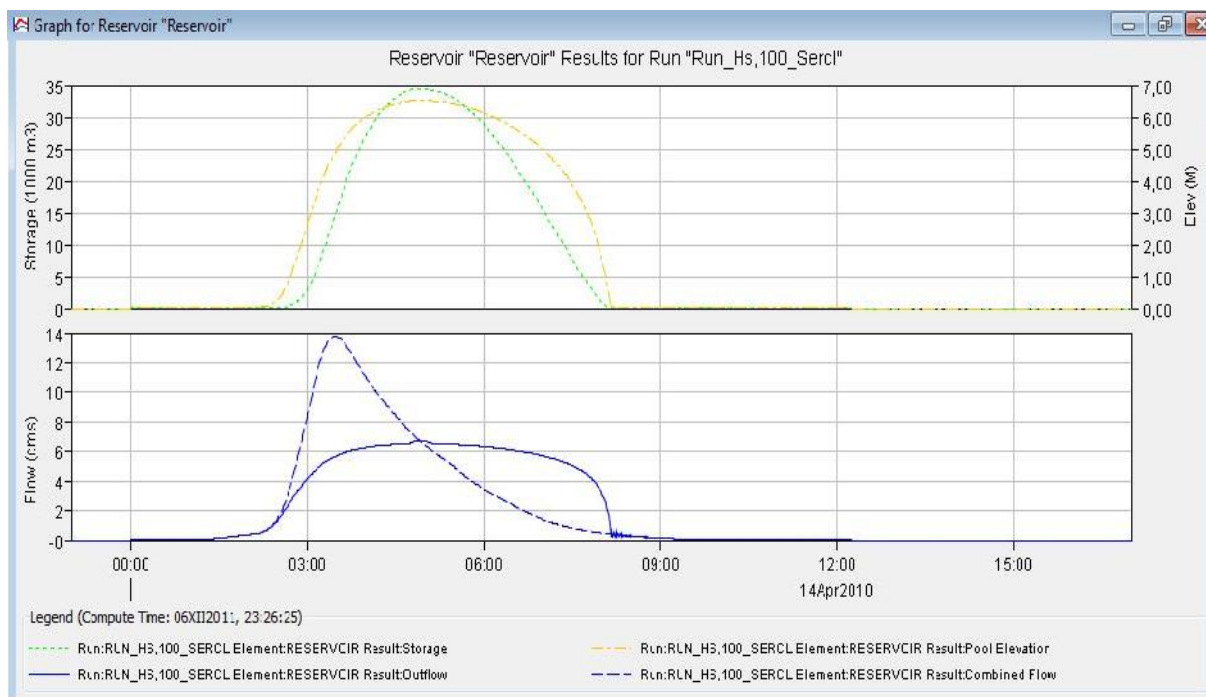
Zatížení extrémní srážko-odtokovou situací

V této fázi byla nádrž s vybranými parametry zatížena extrémní povodňovou situací, kdy návrhový průtok dosahoval hodnoty 27,37 m³/s. Hlavním ukazatelem, na který byla brána největší zřetel, byla konečná poloha vody v nádrži. Jelikož byla koruna hráze navržena ve výšce 7,5 m, neměla by za žádných okolností hladina vody v nádrži překročit tuto kritickou hodnotu. Z následující tabulky je vidět, že k překročení této hodnoty nedošlo a navrhovaná nádrž, by s největší pravděpodobností tento průtok převedla, aniž by došlo k přelítí koruny hráze.

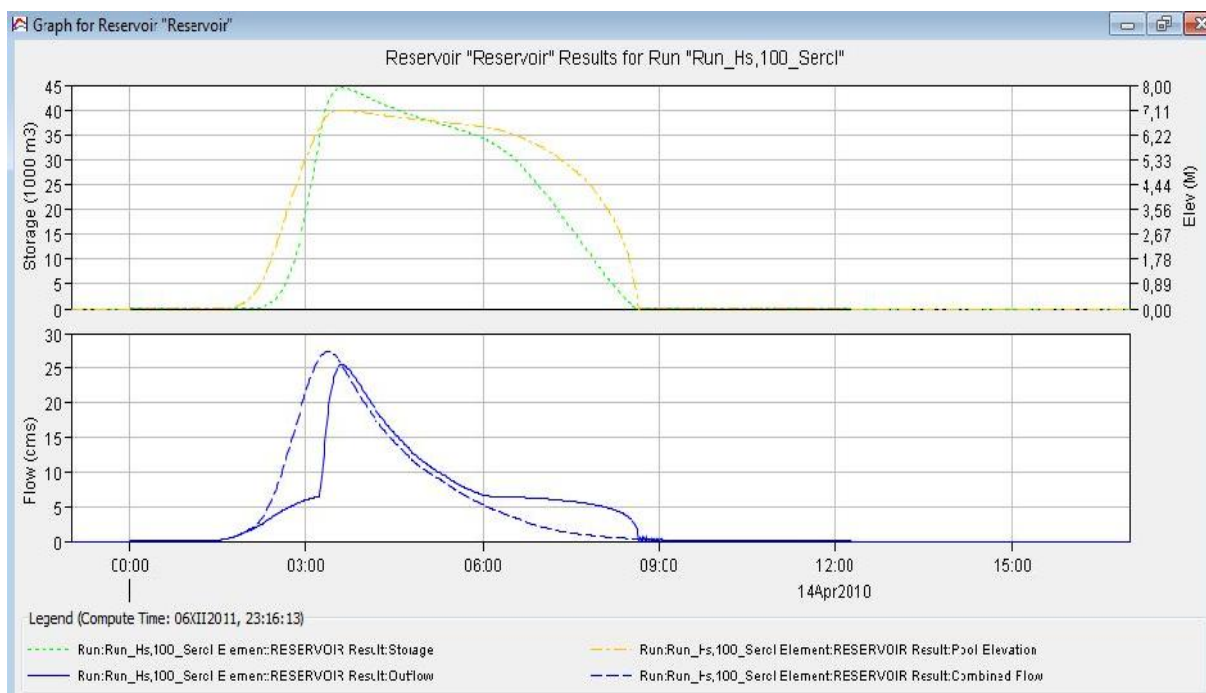
Tab. 21 Průchod extrémní povodňové vlny navrženou nádrží

<i>situace:</i>	CN III uhor		
objekt:	poloha přelivu	6.5	m
	spodní propust DN:	1000	
kulminační přítok		27.368	m ³ /s
kulminační odtok		25.482	m ³ /s
zadržený objem		44.44	1000m ³
poloha vody v nádrži		7.101	m

Z tabulky je však také patrné, že by v tomto případě došlo k takřka zanedbatelnému snížení kulminačního průtoku vlivem ochranné nádrže. Grafické výstupy návrhového a extrémního průtoku jsou na následujících dvou obrázcích.



Obr. 25 Transformace kulminačního průtoku $13,75 \text{ m}^3/\text{s}$ (modrá čárkovaná čára) na výtok z nádrže na hodnotu $6,72 \text{ m}^3/\text{s}$ (modrá plná čára). V horní části průběh hladiny vody v nádrži během povodňové události (žlutá čerchovaná čára) a průběh zadrženého objemu vody v nádrži (zelená tečkovaná čára)



Obr. 26 Zatížení navrhované nádrže extrémním kulminačním průtokem $27,37 \text{ m}^3/\text{s}$. Ve spodní části je vidět, že po dosažení hrany přelivu vzestupná větev hydrogramu prudce stoupá a zastavuje se až na hodnotě $25,48 \text{ m}^3/\text{s}$, v tomto případě se jedná pouze o minimální transformaci povodňového průtoku. Žlutá čára reprezentující hladinu vody v nádrži se však zastavila na hodnotě $7,11 \text{ m}$, což znamená, že nedošlo k přelitu koruny hráze.

Návrh nádrže na extrémní povodňovou situaci

Jako další scénář bylo uvažováno s nasazením extrémní zatěžovací situace, tedy průtokem $27,36 \text{ m}^3/\text{s}$ a pokusem o jeho transformaci na neškodný průtok s hodnotou $8 \text{ m}^3/\text{s}$. Vycházelo se ze stejných metod jako v předchozím případě a po vyhodnocení všech variant nejlépe a nejefektivněji s ohledem na výšku hráze transformovala průtok nádrž se spodní výpustí DN1000 a výškou přelivu 9,5 m. To by však znamenalo, že kóta koruny hráze by byla ve výšce 10,5 m a s použitím vzorce (22) by délka přelivné hrany vycházela 43 m. Už od pohledu je tento návrh velmi předimenzovaný, pro lepší představu byl tento návrh zpracován do výkresové podoby (výkresová dokumentace).

Tab. 22 Parametry nádrže navrhované na extrémní povodňovou situaci, srovnání transformace s přepadem ve výšce 9 a 9,5 m

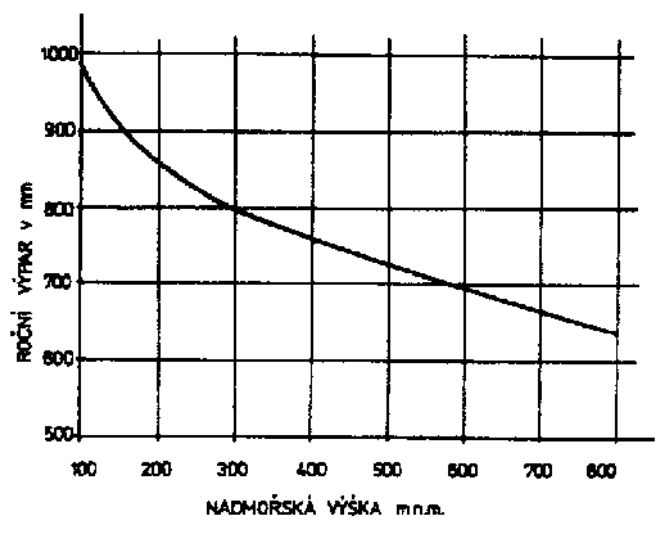
situace:	CN III široko		
objekt:	poloha přelivu	9	m
	spodní propust DN:	1000	
kulminační přítok		26.078	m^3/s
kulminační odtok		9.384	m^3/s
objem		97.591	m^3
poloha vody v nádrži		9.325	m

situace:	CN III široko		
objekt:	poloha přelivu	9.5	m
	spodní propust DN:	1000	
kulminační přítok		26.078	m^3/s
kulminační odtok		7.911	m^3/s
objem		101.173	m^3
poloha vody v nádrži		9.441	m

VÝPOČET BILANCE VODY V NÁDRŽI

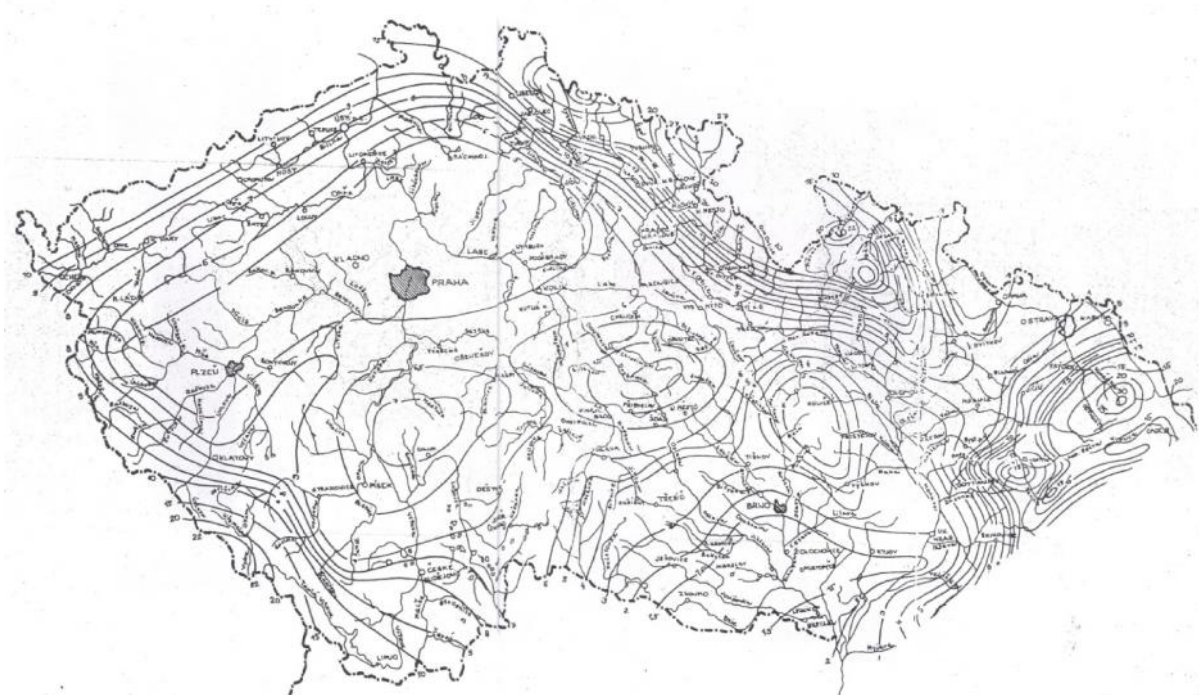
Po návrhu parametrů nádrže a ověření kapacity bezpečnostního objektu se v dalším kroku přistoupilo k výpočtu bilance vody v nádrži, která nám je schopna říct, jestli je v povodí dostatek vody k udržení stálého nadržení (v případě výpočtu je uvažováno s plochou, která odpovídá poloze hladiny ve 3 m) nebo je nutné uvažovat s tím, že nádrž bude v průběhu roku vysychat. Základní vstupy pro tento výpočet tvoří průměrný roční výpar, dlouhodobý průměrný roční průtok, plocha povodí, plocha hladiny při úrovni stálého nadržení a koeficienty C_s a C_v .

Průměrný roční výpar je závislý na průměrné nadmořské výšce zájmového území a odečte se z nomogramu na obr. 27.



Obr. 27 Závislost hodnoty ročního výparu na nadmořské výšce [18]

Pokud v pozorovaném povodí absentuje dlouhodobější hydrologické měření, odečítá se specifický průměrný roční průtok q_a z Mapy izolinií specifického odtoku obr. 28, kde jsou znázorněny izolinie jednotkových průměrných ročních průtoků. Dlouhodobý průměrný roční průtok se vypočte přenásobením jednotkového průměrného ročního průtoku plochou povodí nad závěrovým profilem podle vztahu (23).



Obr. 28 Mapa izolinií specifického odtoku q_a [12]

$$Q_a = q_a * F \quad (23)$$

q_a specifický průměrný roční průtok [$\text{l.s}^{-1}.\text{km}^{-2}$]

F plocha povodí [km^2]

Q_a průměrný roční průtok [l/s]

Koeficienty C_s a C_v jsou závislé na poloze povodí v rámci ČR. Vztah (24) patří do skupiny I a používá se pro oblast Českého středohoří (Bílina, Ploučnice) a severočeské křídly (dolní Jizera); dále povodí Svitavy, Svratky pod Svitavou, Dyje pod Svratkou; přítoky Moravy ze Záhorské nížiny.[12]

$$C_v = \frac{0,92}{q_a^{0,646}} + 0,00637 * \log \frac{2800}{F} \quad (24)$$

$$C_s = 2 * C_v \quad (25)$$

Z hodnoty koeficientu C_s dále vychází hodnoty Φ pro určení m-denních průtoků s různou hodnotou pravděpodobnosti překročení. Hodnoty Φ byly určeny pomocí Foster-Rybkinovy tabulky.

Pro výpočet bilance vody v nádrži bylo uvažováno s průtokem $Q_{r, 80}$, což je hodnota průtoků, která je dosahována s pravděpodobností překročení 80%. Jinými slovy je to hodnota průměrného ročního průtoků v roce srážkově podprůměrném. Z průtoků $Q_{r, 80}$ byl poté vypočten objem přítoku do nádrže $V_{(Q_r, 80)}$. Tato hodnota byla poté procentuelně rozdělena do všech měsíců v roce. To samé bylo provedeno s vypočteným průměrným ročním výparem.

Pokud je pod hrází stálá vodoteč je zapotřebí zajistit vypouštění minimálního zůstatkového průtoků z navrhované nádrže. Ten se vypočte podle vztahu (26). Z této hodnoty se potom vypočte potřeba vypouštění objemu v každém měsíci.

$$MZP = \frac{Q_{330} + Q_{355}}{2} \quad (26)$$

Pro získání bilance vody v nádrži se poté od hodnoty $V_{(Q_r, 80)}$ odečetla hodnota výparu z hladiny a objem vody potřebný pro zachování minimálního zůstatkového průtoků v toku pod nádrží. Všechny hodnoty jsou zobrazeny v tab. 23.

Tab. 23 Tabulka pro výpočet bilance vody v nádrži

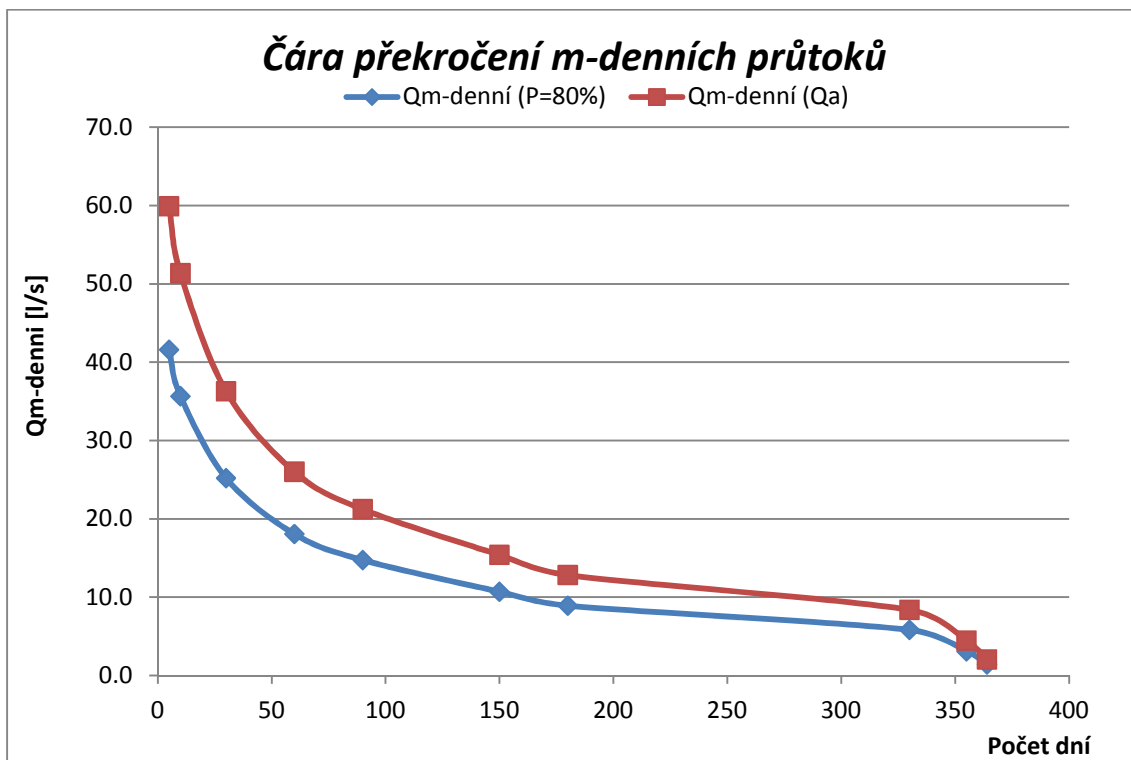
měsíc	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
měsíc % roč.přítoku	7.5	7.5	8.5	12.5	15	14	7.5	5	6.5	5	4.5	6.5
Poč.dní	30	31	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31
Výpar %	4	3	2	2	4	6	11	14.5	18	17	11.5	7
Výpar měsíční [m3]	85.1	63.8	42.6	42.6	85.1	127.7	234.1	308.6	383.1	361.8	244.7	149.0

Cs=0.7 P[%]	0.1	1	5	10	20	50	80	90	95	99	99.9	100
Ø	4.1	2.82	1.82	1.33	0.79	-0.12	-0.85	-1.18	-1.41	-1.78	-2.1	-2.78
Qr,P	42.37	34.49	28.33	25.31	21.99	16.38	11.89	9.85	8.44	6.16	4.19	0.0001

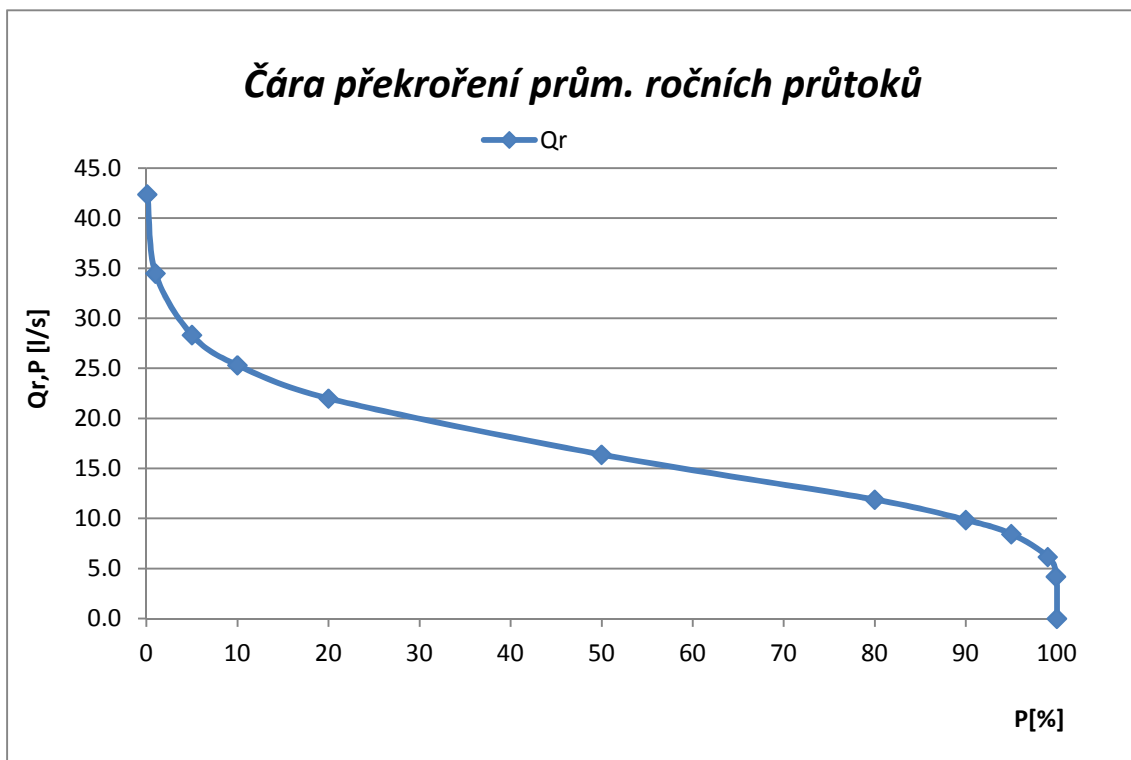
dny	5	10	30	60	90	150	180	330	355	364
% dní v roce	1.37	2.75	8.24	16.48	24.73	41.21	49.45	90.66	97.53	100.00
%Qr	350	300	212	152	124	90	75	49	26	12
Qm(Qr,80) [l/s]	41.60	35.66	25.20	18.07	14.74	10.70	8.91	5.82	3.09	1.43
Qm(Qa) [l/s]	59.93	51.36	36.30	26.02	21.23	15.41	12.84	8.39	4.45	2.05

měsíc	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III	celkem/rok
Přítok [m³]	52 336.1	28 037.2	18 691.5	24 298.9	18 691.5	16 822.3	24 298.9	28 037.2	28 037.2	31 775.5	46 728.6	56 074.4	373 829.1
Výpar [m³]	127.7	234.1	308.6	383.1	361.8	244.7	149.0	85.1	63.8	42.6	42.6	85.1	2 128.1
Zarostlá hadina		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0						0.0
Průsak													
MZP [m³]	16642.2	17196.9	16642.2	17196.9	17196.9	16642.2	17196.9	16642.2	17196.9	17196.9	15532.7	17196.9	202480.0
Bilance [m³]	35 566.2	10 606.2	1 740.7	6 718.9	1 132.7	-64.6	6 953.0	11 309.9	10 776.4	14 536.0	31 153.4	38 792.3	169 221.0

Z vypočtených hodnot potom byly vytvořeny čáry překročení m -denních průtoků pro $Q_{r, 80}$ a Q_a a čára překročení průměrných ročních průtoků.



Graf 6 Čára překročení m -denních průtoků



Graf 7 Čára překročení průměrných ročních průtoků

ZÁVĚR

V této práci byla představena metoda, která maximálně využívá všech dostupných podkladů (LPIS, BPEJ, N-leté srážkové úhrny, 3D vrstevnice,...) a moderních výpočetních a analytických programů v dnešní době velmi rozšířených v hydrologické praxi, jakými jsou GIS a HEC-HMS. U druhého jmenovaného je velkou výhodou, že je navíc bezplatně ke stažení na webových stránkách a disponuje velmi příjemným uživatelským prostředím. Jelikož byla k dispozici řada měření v závěrovém profilu povodí, byl sestavený srážko-odtokový model pomocí těchto dat zkalibrován, aby se ověřilo, jestli model pracuje správně a jeho výstupy se blíží reálným hodnotám. V další fázi se již pracovalo s teoretickou hodnotou 1-denního srážkového úhrnu s dobou opakování $N=100$ let $H_{24, 100}$. Při sestavování srážko-odtokového modelu touto metodou je značnou výhodou možnost velké variability vstupních dat. V této práci bylo sestaveno 48 scénářů v závislosti na míře předchozího nasycení půdního profilu (suchý, průměrně vlhký a nasycený půdní profil), druhu osevního postupu na zemědělské půdě (úžkořádková, širokořádková plodina, louka, úhor), typu časového rozložení příčinné srážky (konstantní, nekonstantní) a metodě hydraulické transformace (Muskingum, Muskingum-Cunge). Výsledky poté ukázaly, že na velikost objemu odtoku mají zásadní vliv pouze druh osevního postupu na zemědělské půdě a míra předchozího nasycení půdního profilu, ostatní dva faktory mají na velikost objemu odtoku zanedbatelný vliv. Jiné to bylo s hodnotou kulminačního průtoku, kde se na jeho velikosti podílely všechny faktory, ne však stejnou měrou. Jako základní scénář byl zvolen scénář s úžkořádkovou plodinou na orné půdě, průměrně vlhkým půdním profilem, nerovnoměrné rozložení srážky a metoda Muskingum, kdy kulminační průtok dosahoval hodnoty $11,27 \text{ m}^3/\text{s}$ jež odpovídala relativní hodnotě 100%. V závislosti na rozložení příčinné srážky se rozdíl kulminačního průtoku pohyboval od 0,9% do 36,4%, v případě volby metody hydraulické transformace činil rozdíl kulminačních průtoků 2,3 – 42%. Zásadnější vliv na hodnotu kulminačního průtoku měl potom druh pěstované plodiny na orné půdě, jež dosahoval odchylky od výchozí hodnoty až 70,8%. Největší vliv pak měla nasycenost půdního profilu, která dokázala ovlivnit kulminační průtok v rozmezích od -93,7% po +102,2% od výchozí hodnoty $11,27 \text{ m}^3/\text{s}$. Z dosažených výsledků je patrné, že stejné povodí může tu samou příčinnou srážku transformovat mnoha různými způsoby a pokaždé jinak.

HEC-HMS umožňuje nejenom zkoumání srážko-odtokových událostí, ale je zde také možnost zapojit do povodí vodní nádrž a sledovat její vliv na transformaci povodňových

průtoků, v závislosti na volbě parametrů bezpečnostního přepadu a dimenzi spodních výpustí. V závislosti na závěrech ze srážko-odtokového modelování byla jako výchozí situace pro návrh optimálních parametrů vodní nádrže zvolena ta, kde kulminační průtok dosahuje hodnoty $11,27 \text{ m}^3/\text{s}$, tedy průměrně nasycený půdní profil, nerovnoměrné rozdělení příčinné srážky v čase, na orné půdě pěstovaná plodina úzkořádková a metoda hydraulické transformace Muskingum. Pro tento návrhový průtok se poté hledala nádrž s nejlepšími transformačními vlastnostmi. Po vyhodnocení několika variant byla jako nejlepší zvolena nádrž se spodní výpustí DN1000 a přepadovou hranou ve výšce 6,5m. Poté byla nádrž s těmito parametry testována na nejextrémnější povodňovou situaci, kdy kulminační průtok dosahoval hodnoty $27,36 \text{ m}^3/\text{s}$, aby se zjistilo, zda nedojde k přelítí koruny hráze. K tomu nedošlo, simulace však ukázala, že nádrž při tomto průtoku ztratila své transformační vlastnosti.

V této práci byla ukázána metoda, která by v praxi mohla sloužit při navrhování vodních nádrží s retenčním účinkem na malých až velmi malých povodích (řádově do 10 km^2). V dnešní době se velmi často s navrhováním malých vodních a suchých nádrží často setkáváme v rámci lokální ochrany obcí. Výhodou této metody je, že do určité míry dovoluje odhadnout tvar návrhového hydrogramu povodně a tím i objem odtoku, který bývá často v inženýrské praxi poddimenzován, volbou špatné metody výpočtu. Pro plochy povodí v řádech desítek až několika stovek km^2 nelze tuto metodu jednoznačně doporučit. U těchto povodí je totiž možné spatřovat výrazný vliv v souběhu a střetávání vln, ve variabilitě plošného rozložení srážek apod. Na takových povodích již hraje významnou roli ČHMÚ. Není také možné tímto způsobem nahrazovat data garantovaná ČHMÚ.

Pro následující vývoj je vhodné testovat metodu na dalších povodích, zejména povodích s různou hydrografií. Inženýrská praxe však může efektivně využít celou řadu volně dostupných podkladů a uvedený způsob řešení je velmi efektivní při studii odtokových poměrů, investičních záměrů apod.

LITERATURA

- [1] PETR DOLEŽAL, JAKUB FELTL , *odborný časopis Littera Scripta, Vysoká škola technická a ekonomická v ČB, po zpracování připomínek recenzentů*, 2011
- [2] MÍSTNÍ AKČNÍ SKUPINA MORAVSKÝ KRAS, *Protierozní zemědělská opatření v zemědělské krajině*, 2010
- [3] US ARMY CORPS OF ENGINEERING CENTER, *Hydrologic Modeling System, HEC-HMS, User's Manual*, 2006
- [4] <http://cs.wikipedia.org/>
- [5] LINSLEY, *Hydrology for Engineers*, New York, 1975
- [6] BORIS VOLOŠ, *Odvození extrémních povodňových vln v malých povodích deterministickými nástroji*, 2008
- [7] DUMBROVSKÝ, M., *Geografické a informační systémy*, 2009
- [8] PETR DOLEŽAL, JAKUB FELTL , *Výběr kritické srážky v malém povodí se zaměřením na generování povrchového odtoku, závěrečná zpráva*, 2011
- [9] Šercl, P., *Vliv fyzicko-geografických faktorů na charakteristiky teoretických návrhových povodňových vln*, sborník prací ČHMÚ Praha, svazek 54, 2009
- [10] Clarke, R.T., *Mathematical models in hydrology. Irrigation and Drainage paper No.19, FAO Rome*, 1973
- [11] Hrádek, F., *Hydrologie. [Skriptum]*. Praha: Vysoká škola zemědělská, 1982
- [12] Kemel, M., *Klimatologie, meteorologie a hydrologie*, Vydavatelství ČVUT Praha, 2000
- [13] Kulasová, B.-Šercl, P. – Boháč, M.. *Verifikace metod odvození hydrologických podkladů pro posuzování bezpečnosti vodních děl za povodní*. Projekt QD1368. [Závěrečná zpráva.] Praha: ČHMÚ. 127s, 2004
- [14] Metodika ÚVTIZ: *Ochrana zemědělské půdy před erozí*. 5/1992.

- [15] US Army Corps of Engineers, *Flood-Runoff Analysis, Engineer manual EM 1110-2-1417*. Washington, DC 20314-1000, 1994
- [16] US ARMY CORPS OF ENGINEERING CENTER, *Geospatial Hydrologic Modeling Extension, HEC-GeoRas*, User's Manual, 2003
- [17] US ARMY CORPS OF ENGINEERING CENTER, *Hydrologic Modeling System, HEC-RAS*, User's Manual, 2003
- [18] ČSN 75 2410, Malé vodní nádrže, Praha: Český normalizační institut, 2011

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

BPEJ	Bonitovaná půdně ekologická jednotka
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav, Praha
LPIS	Land parcel identification system
ZPF	Zemědělský půdní fond
HPJ	Hlavní půdní jednotka
HSP	Hydrologická skupina půd
GIS	Geografický informační systém
DMT	Digitální model terénu
ZABAGET	Základní báze geografických dat
VÚMOP	Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy
HEC-HMS	software vyvinutý v US Army Corps of Engineers
ESRI	společnost zabývající se vývojem softwaru ArcGIS
MZP	Minimální zůstatkový průtok

SCS	Soil Conservation Service
CN	číslo odtokové křivky (Curve Number)
UH	jednotkový hydrogram (Unit hydrograph)
DN	jmenovitý vnitřní průměr potrubí
$H_{24, 100}$	1-denní srážkový úhrn s dobou opakování $N=100$ let
P_e [mm]	akumulovaná hodnota přímého odtoku za časový interval t
P [mm]	akumulovaná hodnota srážky za časový interval t
I_a [mm]	počáteční ztráta ze srážkového úhrnu
S [mm]	maximální potenciální retence
T_c [hod]	doba koncentrace
R [hod]	transformační faktor povodí
S [m ³]	zadržený objem v říčním úseku
K [hod]	čas postupu povodňové vlny říčním úsekem
q_a [l.s ⁻¹ .km ⁻²]	specifický průměrný roční průtok
F [km ²]	plocha povodí
Q_a [l/s]	průměrný roční průtok
I [m ³ /s]	průměrný přítok do říčního úseku
O [m ³ /s]	průměrný odtok z říčního úseku
X [-]	transformační faktor, <0;0,5>
S [m ²]	obsah otvoru, kterým vytéká voda
μ [-]	součinitel ztrát pro výtok otvorem
g [m/s ²]	gravitační zrychlení

H [m]	poloha hladiny vody
m [-]	přepadový součinitel
b_0 [m]	účinná šířka přelivu
h [m]	výška přepadového paprsku
b [m]	šířka přelivné hrany bez bočních kontrakcí
K_v [-]	součinitel vtoku

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Ukázka tabulky pro určení CN čísla[7]	28
Tab. 2 Maximální průtoky a transport látek během stoupající vlny extrémních srážko- odtokových situací v povodí Němčického potoka[VÚMOP, v.v.i.]	35
Tab. 3 Porovnání hodnot kulminačních průtoků naměřených ve vodoměrné stanici a vymodelovaných v programu HEC-HMS.....	38
Tab. 4 Porovnání kulminačních průtoků pro suchý půdní profil	42
Tab. 5 Porovnání kulminačních průtoků pro půdní profil s průměrnou vlhkostí	42
Tab. 6 Porovnání kulminačních průtoků pro nasycený půdní profil.....	43
Tab. 7 Procentuální srovnání kulminačních průtoků s ohledem na nasycení půdního profilu, zvolenou metodu hydraulické transformace, půdní pokryv a časové rozdělení příčinné srážky.....	43
Tab. 8 Procentuální srovnání kulminačních průtoků s ohledem na nasycení půdního profilu, zvolenou metodu hydraulické transformace, půdní pokryv a časové rozdělení příčinné srážky.....	43
Tab. 9 Procentuální srovnání kulminačních průtoků s ohledem na nasycení půdního profilu, zvolenou metodu hydraulické transformace, půdní pokryv a časové rozdělení příčinné srážky.....	44
Tab. 10 Porovnání objemu odtoku v závislosti na mnoha srážko-odtokových faktorech.....	44
Tab. 11 Porovnání objemu odtoku v závislosti na mnoha srážko-odtokových faktorech.....	44
Tab. 12 Porovnání objemu odtoku v závislosti na mnoha srážko-odtokových faktorech.....	45

Tab. 13 Procentuální srovnání objemů odtoku s ohledem na nasycení půdního profilu, zvolenou metodu hydraulické transformace, půdní pokryv a časové rozdělení příčinné srážky.....	45
Tab. 14 Procentuální srovnání objemů odtoku s ohledem na nasycení půdního profilu, zvolenou metodu hydraulické transformace, půdní pokryv a časové rozdělení příčinné srážky.....	45
Tab. 15 Procentuální srovnání objemů odtoku s ohledem na nasycení půdního profilu, zvolenou metodu hydraulické transformace, půdní pokryv a časové rozdělení příčinné srážky.....	46
Tab. 16 Výpočet délky přelivné hrany s ohledem na výšku přepadového paprsku	54
Tab. 17 Hodnoty, za kterých by nádrž byla schopna pojmout celý objem odtoku z experimentálního povodí	54
Tab. 18 Uspořádání vlastností nádrže (spodní výpust DN1000), kulminační odtok, zadržený objem a poloha vody v nádrži v závislosti na poloze přelivné hrany	55
Tab. 19 Uspořádání vlastností nádrže (spodní výpust DN300)	56
Tab. 20 Uspořádání vlastností nádrže (spodní výpust DN500)	57
Tab. 21 Průchod extrémní povodňové vlny navrženou nádrží	58
Tab. 22 Parametry nádrže navrhované na extrémní povodňovou situaci, srovnání transformace s přepadem ve výšce 9 a 9,5 m	60
Tab. 23 Tabulka pro výpočet bilance vody v nádrži	63

SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFICKÝCH PŘÍLOH

Obr. 1 Rozvodnice povodí Němčického potoka	13
Obr. 2 Příklad jednotkového hydrogramu pro déšť doby trvání D [4]	16
Obr. 3 Skládání jednotkového hydrogramu s využitím principu superpozice a časové invariance [4]	17
Obr. 4 Závislost tvaru vtokové hrany na součiniteli vtoku K_{v0}	24
Obr. 5 Mapa bonitovaných půdně ekologických jednotek BPEJ v zájmové oblasti	26
Obr. 6 Mapa využití parcel v zájmovém území Němčického potoka	27
Obr. 7 Mapa CN čísel vytvořená v programu GIS	28
Obr. 8 Digitální model terénu vytvořený v programu GIS	29

Obr. 9	Charakteristické oblasti na území ČR lišící se tvarem návrhového hyetogramu [9] ..	30
Obr. 10	Návrhové hyetogramy pro povodí o ploše 4 km ² [9]	31
Obr. 11	Závislost hodnot CN a potenciální retence ve vztahu k předchozím vláhovým podmínkám [9]	32
Obr. 12	Povodí Němčického potoka	33
Obr. 13	Schematizace povodí v programu HEC-HMS.....	33
Obr. 14	Měrná stanice v závěrovém profilu experimentálního povodí	34
Obr. 15	Ostrohranný měrný přepad s infračerveným snímáním hladiny.....	35
Obr. 16	Ukázka výstupu z programu HEC-HMS, nahoře příčinná srážka, dole hydrogram vyvolaný touto srážkovou událostí	37
Obr. 17	Ukázka hydrogramu v závěrovém profilu povodí, modrá barva je hydrogram vymodelovaný v programu HEC-HMS, černá čára znázorňuje hodnotu naměřeného kulminačního průtoku pomocí měrného přelivu.....	37
Obr. 18	Tabulka pro vkládání počáteční ztráty a CN čísla pro jednotlivá povodí	38
Obr. 19	Tvar hydrogramu způsobený příčinnou srážkou $H_{24,100}$ s konstantním rozdělením na subpovodí W90, s nasyceným půdním profilem a uvažovanou širokořádkovou plodinou na veškeré zemědělské půdě, červená část hyetogramu označuje část srážky zadrženou v povodí, modrá část tvoří vodu odtékající pryč z povodí, tvořící povrchový odtok....	40
Obr. 20	Tvar hydrogramu způsobený příčinnou srážkou $H_{24,100}$ s konstantním rozdělením na subpovodí W70, se suchým půdním profilem a s uvažovaným lučním společenstvem na veškeré orné půdě.....	40
Obr. 21	Tvar hydrogramu způsobený příčinnou srážkou $H_{24,100}$ s nekonstantním rozdělením podle [9] na subpovodí W110, se suchým půdním profilem a s uvažovaným lučním společenstvem na veškeré orné půdě.....	41
Obr. 22	Tvar hydrogramu způsobený příčinnou srážkou $H_{24,100}$ s nekonstantním rozdělením podle [9] na subpovodí W90, s nasyceným půdním profilem a širokořádkovou plodinou na zemědělské půdě.....	41
Obr. 23	Umístění nádrže v rámci experimentálního povodí	50
Obr. 24	Schematizace povodí se zapojením malé vodní nádrže.....	51
Obr. 25	Transformace kulminačního průtoku 13,75 m ³ /s (modrá čárkovaná čára) na výtoku z nádrže na hodnotu 6,72 m ³ /s (modrá plná čára). V horní části průběh hladiny vody v nádrži během povodňové události (žlutá čerchovaná čára) a průběh zadrženého objemu vody v nádrži (zelená tečkovaná čára)	59

Obr. 26 Zatížení navrhované nádrže extrémním kulminačním průtokem 27,37 m ³ /s. Ve spodní části je vidět, že po dosažení hrany přelivu vzestupná větev hydrogramu prudce stoupá a zastavuje se až na hodnotě 25,48 m ³ /s, v tomto případě se jedná pouze o minimální transformaci povodňového průtoku. Žlutá čára reprezentující hladinu vody v nádrži se však zastavila na hodnotě 7,11 m, což znamená, že nedošlo k přelití koruny hráze	59
Obr. 27 Závislost hodnoty ročního výparu na nadmořské výšce [18]	61
Obr. 28 Mapa izolinií specifického odtoku q_a [12]	61
Graf 1 Graf znázorňující závislost objemu odtoku na transformačních vlastnostech povodí .	47
Graf 2 Závislost kulminačních průtoků na vlastnostech povodí (metoda Muskingum, nerovnoměrné rozložení příčinné srážky)	49
Graf 3 Závislost kulminačních průtoků na vlastnostech povodí (metoda Muskingum-Cunge, nerovnoměrné rozložení příčinné srážky)	49
Graf 4 Ukázka Q - h křivky nádrže v případě spodní výpusti DN500 a přelivné hrany vysoké 5 metrů a délkou přelivné hrany 20 m	52
Graf 5 Čára zatopených ploch	53
Graf 6 Čára překročení m -denních průtoků	64
Graf 7 Čára překročení průměrných ročních průtoků	64